

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт неразрушающего контроля  
Направление подготовки Приборостроение  
Профиль Системы ориентации, стабилизации и навигации  
Кафедра точного приборостроения

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Трехэлектродный инжектор малогабаритного циклического ускорителя электронов

УДК 621.384.63:621.3.038.613

**Студент**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич		

**Руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. ТПС	Бориков В.Н.	д.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. МЕН	Николаенко В.С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ	Мезенцева И.Л.			

По разделу «Вопросы технологии»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТПС	Гормаков А. Н.	к. т. н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. ТПС	Бориков В.Н.	д.т.н., доцент		

Томск – 2017 г.

# ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	<b>Способность</b> совершенствовать и повышать свои специальные знания в области математических, физических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;
P2	<b>Способность</b> адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.
P3	<b>Способность</b> использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.
P4	<b>Способность</b> к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты инженерной деятельности в областях контроля деформации измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не связанных со сферой деятельности.
P5	<b>Умение</b> использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя макеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении.
P6	<b>Умение</b> профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и социальную ответственность.
P7	<b>Способность</b> проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.
P8	<b>Умение</b> разрабатывать результаты исследований по анализу; способность разработать и проводить оптимизацию натурных экспериментальных

	исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности.
P9	<b>Умение</b> организовывать современное обеспечение технологических процессов производства приборных систем; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.
P10	<b>Способность</b> проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.
P11	<b>Способность</b> формулировать цели, определять задачи, выбирать методы исследования в области приборостроения на основе подбора и изучения литературных и патентных и других источников; разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию на объекты приборостроения, а также осуществлять системные мероприятия по реализации разработанных проектов и программ; составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам исследовательской деятельности

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего Контроля  
Направление подготовки Приборостроение  
Профиль Системы ориентации, стабилизации и навигации  
Кафедра Точного приборостроения

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Бориков В. Н.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич

Тема работы:

Трехэлектродный инжектор малогабаритного циклического ускорителя электронов	
Утверждена приказом директора ИНК	№ 2263/с от 31.03.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе	Объектом исследования является инжектор малогабаритного бетатрона РБКЗ-3М и влияние его геометрических параметров на эффективность ускорения. Цель исследования – повышение эффективности инжекции в малогабаритном бетатроне. Ожидаемые результаты: рекомендации по изменениям геометрических параметров инжектора бетатрона и их допускам.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Теоретический обзор Определение метода исследования Выбор среды моделирования Разработка компьютерной модели Разработка алгоритма исследования Анализ результатов компьютерного моделирования Оценка результатов Технологический процесс изготовления ториевооксидного катода Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Социальная ответственность Выводы по результатам работы
Перечень графического	Презентация PowerPoint Графики результатов моделирования

материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич, ассистент
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна, ассистент
Технология	Гормаков Анатолий Николаевич, к.т.н., доцент
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1. Влияние геометрических параметров трехэлектродного инжектора на коэффициент токораспределения	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. ТПС	Бориков В.Н.	д.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич

Институт	ИНК	Кафедра	Точное приборостроение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Расчет бюджета научно-исследовательской работы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведены анализы: потенциальные потребители результатов исследования, конкурентные технические решения с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, SWOT-анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение структуры плана проекта и трудоёмкости работ, разработка графика проведения НИ, бюджет НИ.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение интегрального показателя финансовой эффективности, интегрального показателя ресурсоэффективности.
Перечень графического материала(с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений	
2. Матрица SWOT	
3. График проведения и бюджет НИ	
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. МЕН	Николаенко В.С.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич

<b>Институт</b>	<b>ИНК</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Точное приборостроение</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	-Объектом исследования является бетатрон – циклический ускоритель электронов, который используется для получения электронов высоких энергии, которые могут быть преобразованы в гамма-излучение. - Область применения: в онкологических клиниках для проведения комбинированного лечения с интраоперационной лучевой терапией; дефектоскопия; таможенный контроль
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность	1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации с системой мониторинга конструкций: <ul style="list-style-type: none"> <li>• повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;</li> <li>• повышенный уровень шума;</li> <li>• повышенный уровень ЭМИ.</li> </ul> 1.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований: <ul style="list-style-type: none"> <li>• отклонение параметров микроклимата;</li> <li>• недостаточная освещенность рабочей зоны.</li> </ul>
2. Экологическая безопасность	2.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду 2.2. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования. 2.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<ul style="list-style-type: none"> <li>• метеорологические;</li> <li>• диверсия;</li> </ul>
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Место в положении сидя и стоя должно соответствовать требованиям: <b>- ГОСТ 12.2.032-78;</b> - ГОСТ 12.2.033-78; - ГОСТ 22269-76 .

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

### Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент каф. ЭБЖ	Мезенцева И.Л.			

### Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНСТРУИРОВАНИЕ И ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич

Институт	ИНК	Кафедра	Точное приборостроение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

### Исходные данные к разделу «Вопрос конструирования и технологии»:

1. Объекта разработки и области его применения	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Объектом проектирования является ториевооксидный катод.</li> <li>- Область применения: вакуумные камеры бетатронов</li> <li>- Объем производства: опытная партия (20 шт.).</li> </ul>
--	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Выбор типа катода
2. Выбор материала катода
3. Разработка технологического процесса создания катода

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТПС	Гормаков А. Н.	к. т. н., доцент		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5В	Коломейцев Андрей Анатольевич		



**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля  
 Направление подготовки Приборостроение  
 Профиль Системы ориентации, стабилизации и навигации  
 Кафедра точного приборостроения  
 Уровень образования магистратура  
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2017 г.	Создание модели. Проведение исследований.	25
03.04.2017 г.	Анализ результатов.	25
08.05.2017 г.	Раздел «Социальная ответственность»	15
15.05.2017 г.	Раздел «Конструирование и вопросы технологии»	15
22.05.2017 г.	Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10
05.06.2017 г.	Оформление ВКР и представление работы рецензенту	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. ТПС	Бориков В.Н.	д. т. н., доцент		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. ТПС	Бориков В. Н.	д. т. н. доцент		

Выпускная квалификационная работа на 142 страницах, 40 рисунков, 26 таблиц, 35 формул, 34 литературных источника и 2 приложения.

Ключевые слова: бетатрон, инжектор, конечно-элементный анализ, трассировка частиц, потенциальная функция.

Объектом исследования является инжектор бетатрона.

Цель работы – исследование процесса инжекции в бетатроне, определение причин низкой эффективности захвата электронов и поиск конструкторских решений по увеличению эффективности инжекции электронов.

В процессе исследования проводилась моделирование этапа инжекции бетатрона.

В результате исследования создана компьютерная модель для исследования свойств бетатрона, приведены рекомендации по изменению конструкции инжектора для повышения эффективности инжекции электронов в ускоряющее поле.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: бетатрон МИБ-10 с вакуумной камерой БУК-6 и инжектором типа пушка Керста с напряжением 40 кВ.

Степень внедрения: не внедрен, находится на стадии разработки.

Область применения: увеличение выходной дозы бетатрона.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в улучшении технических характеристик бетатрона, а также в уменьшении количества бракованных вакуумных камер, что увеличит востребованность бетатронов на рынке и снизит их себестоимость.

В будущем планируется изготовление бетатронов с улучшенными характеристиками инжекторов в вакуумных камерах.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

### **Нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;

ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

### **Определения**

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**Comsol Multiphysics** – мультифизическая среда инженерного анализа;

**Бетатрон** индукционный циклический ускоритель электронов;

**Инжектор** – устройство, с помощью которого получают пучок электронов с заданной кинетической энергией и заданной конфигурации;

**Метод главного критерия** – метод последовательного исследования влияния каждого параметра на систему, при сохранении значений остальных параметров постоянными;

**Метод макрочастиц** – метод, основанный на замене группы частиц одной макрочастицей, имеющей свойства группы;

**Показатель спадания магнитного поля** – логарифмический градиент магнитного поля;

**Программное обеспечение (ПО)** – все или часть программ, процедур, правил и соответствующей документации системы обработки информации;

**Соотношение 2:1** – бетатронное соотношение, при котором в ускоряющем поле бетатрона существует равновесная орбита;

## **Обозначения и сокращения**

РБК – рентгеновская бетатронная камера.

БУК – бетатронная ускорительная камера.

МИБ-10 – малогабаритный индукционный бетатрон с энергией пучка 10 МэВ.

CAD – Computer Aided Design.

CAE – Computer Aided Engineering.

САПР – система автоматизированного проектирования.

МКЭ – метод конечных элементов.

СЛАУ – система линейных арифметических уравнений.

ПК – персональный компьютер.

КПД – коэффициент полезного действия.

МКЭ – метод конечных элементов.

КЭ – конечный элемент.

КЭС – конечно-элементная сетка.

ГП – горячее прессование.

ЭМП, ЭСП – электромагнитное, электростатическое поле.

ЭМИ, ЭСИ – электромагнитное, электростатическое излучение.

СИЗ – средства индивидуальной защиты.

ПДК – предельно допустимая концентрация.

ЧС – чрезвычайные ситуации.

## Оглавление

Введение.....	16
1. Принцип действия бетатрона.....	18
1.1. Устойчивое движение электрона в магнитном поле бетатрона .....	25
1.2. Потенциальная функция .....	30
2. Система инъекции .....	35
2.1. Требования к системе инъекции .....	35
2.2. Вакуумная камера и инжекторное устройство .....	41
3. Компьютерное моделирование.....	47
3.1. Постановка задачи .....	48
3.2. Модель бетатрона .....	50
3.3. Определение свойств материалов.....	52
3.4. Определение граничных условий .....	53
3.4.1. Физика «Magnetic Fields» .....	53
3.4.2. Физика «Electrostatics».....	55
3.4.3. Физика «Charged Particle Tracing».....	55
3.4.4. Влияние начальных тепловых скоростей электронов на формирование электронных потоков.....	57
3.5. Конечно-элементная сетка.....	59
3.6. Расчет .....	61
4. Результаты моделирования .....	62
4.1. Характеристики магнитного поля.....	62
4.2. Характеристики электрического поля.....	68
4.3. Трассировка заряженных частиц .....	71
5. Влияние геометрических параметров на коэффициент токораспределения	74
5.1. Начальные условия.....	74
5.2. Горизонтальное смещение катода .....	76
5.3. Вертикальное смещение катода .....	77
5.4. Угол наклона фокусирующего электрода относительно анода.....	78
5.5. Ширина ФЭ .....	80

5.6. Высота ФЭ .....	81
5.7. Несоосность.....	82
5.8. Расстояние между верхней пластиной фокусирующего электрода и анодом .....	83
5.9. Расстояние между фокусирующим электродом и щелью анода .....	85
6. Технологический процесс изготовления ториеооксидного катода .....	88
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	94
7.1. Предпроектный анализ .....	95
7.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования .....	95
7.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	95
7.1.3. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования .....	97
7.1.4. SWOT-анализ.....	97
7.2. Инициация проекта .....	99
7.3. План проекта.....	100
7.3.1. Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	101
7.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ....	105
7.4.1. Объем платежеспособного рынка .....	105
7.4.2. Интегральный показатель эффективности научного исследования	106
8. Социальная ответственность .....	107
8.1. Профессиональная социальная безопасность.....	108
8.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования .....	108
8.1.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	112
8.1.3. Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	115
8.2. Экологическая безопасность .....	116

8.2.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....	116
8.2.2. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования .....	117
8.2.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.....	118
8.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	118
8.3.1. Защита в чрезвычайных ситуациях .....	118
8.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	120
8.4.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	120
8.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	121
Заключение .....	124
Список публикаций.....	125
Список использованной литературы.....	126
Приложение А .....	130
Приложение Б .....	147

## Введение

Инжектор является одной из наиболее важных составляющих бетатрона. Именно параметрами инжектора в значительной степени определяется максимальное количество электронов, которые могут быть захвачены магнитным полем бетатрона. Однако, до сих пор, до конца не определены наиболее оптимальные геометрические параметры инжектора. Кроме того, не определен допустимый производственный разброс этих параметров (производственный допуск).

Из огромного количества электронов, выпускаемых катодом инжектора, лишь их малая часть захватывается в ускорение. Для такого утверждения имеется множество экспериментально проверенных причин. К их числу можно отнести следующие:

- недостаточная энергия инжекции;
- низкая плотность пространственного заряда электронов;
- низкая точность синхронизации между инжекцией и ускоряющим магнитным потоком;
- недостаточная стабильность параметров импульсов напряжения;
- неоптимальная геометрия и взаиморасположение электродов.

Целью данной работы является исследование процесса инжекции электронов в межполюсное пространство бетатрона, определение причин низкой эффективности инжекции электронов и поиск конструкторских и технологических решений по повышению эффективности захвата электронов в ускоряющее поле бетатрона.

Для достижения поставленных целей были поставлены следующие задачи:

- воссоздать компьютерную модель бетатрона с инжектором;



- с помощью моделирования провести качественную и количественную оценку влияния геометрических параметров системы;
- предложить способы увеличения эффективности захвата электронов.

Объектом исследования является бетатрон МИБ-10 с энергией ускоренного пучка 10 МэВ. Предмет исследования – этап инжекции электронов в ускоряющее поле бетатрона.

## 1. Принцип действия бетатрона

Идея индукционного метода ускорения заряженных частиц состоит в следующем. Всякий переменный магнитный поток индуцирует в окружающем пространстве электрическое поле. Это особое поле, поле вихревого типа; его силовые линии, идущие вокруг индуцирующего магнитного потока, являются замкнутыми линиями. В частности, если магнитный поток обладает осевой симметрией распределения интенсивности магнитного поля, то силовые линии индуцированного электрического поля будут представлять собой концентрические окружности, плоскость которых перпендикулярна к центральной оси магнитного поля, а центр совпадает с ее следом на этой плоскости. Наличие электрического поля можно использовать для ускорения частиц, обладающих электрическим зарядом. А то обстоятельство, что силовые линии индуцированного электрического поля замкнуты, приводит к чрезвычайно существенным следствиям. В электрическом поле вихревого типа потенциал не является однозначной функцией координаты. Поэтому если заставить электрон описать в таком поле какой-либо замкнутый путь, то энергия, которую электрон при этом приобретет за счет сил поля, не должна быть равной нулю, как это было бы в случае постоянного электростатического поля. В этом можно убедиться наглядно, если представить себе движение электрона по замкнутому пути, совпадающему с одной из силовых линий индуцированного электрического поля. В этом случае на электрон на всем протяжении его движения будет действовать сила, направление которой неизменно совпадает с направлением движения электрона, и благодаря этому, возвратившись в исходную точку, он будет обладать соответственно большей скоростью, то есть большей кинетической энергией, чем в начале пути. Выигрыш энергии на одном таком обороте может быть и небольшим, но если этот процесс повторить многократно, то можно сообщить электрону весьма большую энергию.

Сделаем небольшой расчет, который покажет, каковы примерно цифры, о которых здесь можно говорить. Напряженность  $E_r$  электрического поля, индуцированного магнитным потоком с осевой симметрией, является функцией расстояния  $r$  данной точки до оси вращения и производной магнитного потока  $\Phi$  по времени. Разность потенциалов, соответствующая одному обходу вокруг центральной оси магнитного поля по окружности радиуса  $r$ , будет составлять

$$\Delta U_r = 2\pi r \cdot E_r \quad (1)$$

Предположим, что за время 1 мс магнитный поток изменяется равномерно ( $d\Phi / dt = \text{const}$ ), причем скорость его изменения такова, что значение  $\Delta U_r = 20$  В получается на радиусе  $r = 5$  см. Это означает, что если в такое магнитное поле коаксиально поместить один виток проволоки диаметром 10 см, то в нем будет индуцироваться ЭДС в 20 В.

Допустим теперь, что вместо витка проволоки мы поместим в то же магнитное поле вакуумную камеру, в которой на расстоянии 5 см от центральной оси имеется сначала неподвижный свободный электрон. Под действием индуцированного электрического поля этот электрон начнет двигаться сначала вдоль проходящей через данную точку силовой линии электрического поля, а затем, вследствие инерции и других причин, по некоторой траектории, отнюдь не совпадающей с этой линией. Но мы предположим, что найден способ заставить электрон, движущийся в идеальном вакууме под действием силы вихревого электрического поля, не сходить с силовой линии этого поля. Какую энергию приобретет в таких условиях электрон за время 1 мс? Этот случай представляет собой движение тела под действием постоянной силы, но при непрерывном возрастании массы тела в соответствии с ростом его скорости. Точный релятивистский расчет показывает, что в таком электрическом поле длина пути электрона за время 1 мс составит 290 км, т. е. он сделает за это время 925 000 оборотов вокруг центральной оси магнитного поля. Чтобы этот результат не казался удивительным, вспомним, что из-за малости своей массы электрон уже при

малой пройденной им разности потенциалов приобретает огромную скорость. В нашем примере электрон после первого оборота приобретает кинетическую энергию 20 эВ, что соответствует скорости электрона  $2,67 \cdot 10^6$  м/сек. Так как за счет силы индуцированного электрического поля электрон независимо от его массы на каждом обороте приобретает энергию в 20 эВ, то, следовательно, в итоге его кинетическая энергия будет равна  $W = 20 \cdot 925000 = 1,85 \cdot 10^7$  эВ, или 18,5 МэВ. [1]

Приведенный пример ясно показывает, что с помощью электромагнитной индукции действительно возможно сообщать электронам большие энергии. Однако сама по себе идея ускорять электроны, заставляя их двигаться вдоль силовых линий индуцированного электрического поля, не имела бы никакой практической ценности, если бы она не дополнялась указанием способа, с помощью которого можно на самом деле удерживать движущийся электрон на силовой линии вихревого электрического поля на замкнутой вокруг магнитного потока орбите неизменного радиуса.

Самый важный результат, полученный Видероз при теоретическом анализе вопроса об ускорении электронов с помощью электромагнитной индукции, состоит именно в том, что он обнаружил замечательную возможность автоматического управления движением электронов в индукционном ускорителе. Возможность эта заключается в следующем: в бетатроне магнитное поле нарастает в течение времени ускорения. В этом случае на электрон действуют два противоположных фактора: нарастающее магнитное поле действует в сторону непрерывного уменьшения радиуса орбиты, а вихревое электрическое поле – в сторону непрерывного увеличения его. В бетатроне эти два фактора при определенном соотношении средней индукции в круге орбиты  $B_{cp}$  и индукции  $B_0$  на радиусе равновесной орбиты  $R_0$  (рис. 1) уравнивают друг друга, и электроны в нарастающем магнитном поле движутся по орбите постоянного радиуса  $R_0$ , непрерывно набирая энергию под действием силы вихревого электрического поля.

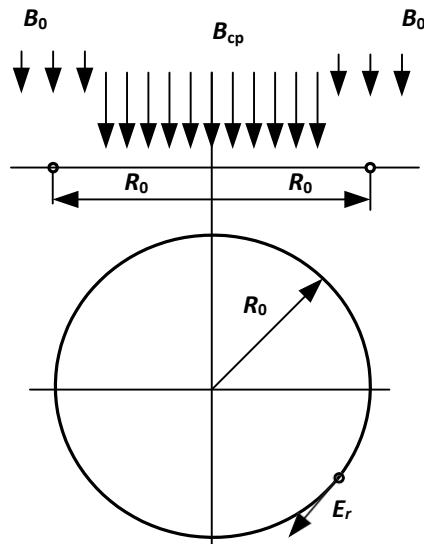


Рисунок 1 – Принципиальная схема бетатрона

Вихревое электрическое поле  $E_r$  возникает из-за того, что во время ускорения увеличивается магнитный поток  $\Phi_0$ , пронизывающий площадь, ограниченную кругом радиуса  $R_0$ . Значение напряженности ускоряющего вихревого электрического поля  $E_r$  связано со скоростью изменения магнитного потока  $\Phi_0$  формулой

$$E_r = \frac{1}{2\pi R_0} \frac{\Delta \Phi_0}{\Delta t}. \quad (2)$$

Сила, действующая на электрон, равна

$$F = eE_r = \frac{e}{2\pi R_0} \frac{\Delta \Phi_0}{\Delta t}. \quad (3)$$

Умножая это равенство на  $\Delta t$ , получаем приращение импульса силы  $\Delta p = F\Delta t$ , ускоряющей электрон. Следовательно, приращение импульса равно

$$\Delta p = \frac{e}{2\pi R_0} \Delta \Phi_0. \quad (4)$$

Если в начале цикла ускорения, как импульс электронов, так и магнитный поток равнялись нулю, то

$$p = \frac{e}{2\pi R_0} \Phi_0. \quad (5)$$

Связь между ведущим магнитным полем  $B_0$  и импульсом электрона  $p$  можно определить следующим образом. На электрон, движущийся в магнитном поле по круговой орбите радиуса  $R_0$  со скоростью  $v$ , действуют сила Лоренца

$$F_{\text{л}} = e \cdot \vartheta \cdot B_0 \quad (6)$$

и центробежная сила

$$F_{\text{ц}} = \frac{m\vartheta^2}{R_0}. \quad (7)$$

Приравнивая эти две силы, получаем

$$m\vartheta = e \cdot R_0 \cdot B_0. \quad (8)$$

Но  $m\vartheta$  есть импульс электрона  $p$ , следовательно

$$p = e \cdot R_0 \cdot B_0. \quad (9)$$

Сравнивая формулы (4) и (8), получаем

$$e \cdot R_0 \cdot B_0 = \frac{e}{2\pi R_0} \Phi_0. \quad (10)$$

Эту формулу можно переписать в виде

$$B_0 = \frac{\Phi_0}{2\pi R_0^2}. \quad (11)$$

Величина  $\frac{\Phi_0}{\pi R_0^2}$  есть отношение магнитного потока  $\Phi_0$  к площади  $S$ , охватываемой орбитой радиуса  $R_0$ , т. е. равна среднему значению  $B_{\text{ср}}$  индукции магнитного поля, пронизывающего орбиту. В итоге имеем

$$B_0 = \frac{1}{2} B_{\text{ср}}. \quad (12)$$

Итак, электрон будет в нарастающем магнитном поле двигаться по круговой орбите неизменного радиуса в том случае, если индукция магнитного поля  $B_0$  в точках этой орбиты во всякий момент времени будет вдвое меньше средней индукции магнитного поля  $B_{\text{ср}}$  внутри орбиты. В этом случае рост скорости, точнее импульса, электрона в индуцированном электрическом поле будет происходить все время пропорционально росту магнитного поля в точках орбиты, так что получится  $R_0 = \text{const}$ . Условие  $B_0 = \frac{1}{2} B_{\text{ср}}$  выполняется независимо от того, каков именно закон изменения во времени производной  $d\Phi/dt$ , входящей в выражении (3). Необходимо лишь, чтобы за время процесса ускорения электрона знак ее не менялся, иначе изменится и знак напряженности  $E_r$  индуцированного электрического поля. Соотношение (12) в

этом случае не нарушится, т. е. электрон останется на той же равновесной орбите, но он будет замедляться полем  $E_z$ , а не ускоряться. Орбита, для которой справедливо бетатронное соотношение, называется равновесной орбитой, а ее радиус – радиусом равновесной орбиты [2].

Следует особо подчеркнуть, что сформулированное выше условие существования равновесной орбиты в индукционном ускорителе электронов совершенно не зависит от массы электрона. Поэтому, в отличие от того, что имеет место в случае циклотрона, работа бетатрона не нарушается и тогда, когда масса ускоряемой частицы, набравшей скорость, близкую к скорости света, увеличивается во много раз.

Бетатрон по своей природе является ускорителем импульсного действия, так как частицы ускоряются лишь до тех пор, пока магнитный поток увеличивается. После окончания ускорения магнитный поток уменьшается до исходного значения, после чего могут быть ускорены новые частицы.

Под ускорением электронов в бетатроне понимается ряд взаимосвязанных процессов, проходящих последовательно в течение цикла ускорения. Такими процессами являются инжекция (ввод) частиц на равновесную орбиту, собственно сам процесс ускорения частиц и вывод частиц из ускорительной камеры (или сброс их на мишень). Последовательность этих процессов иллюстрируется на рисунке 2.

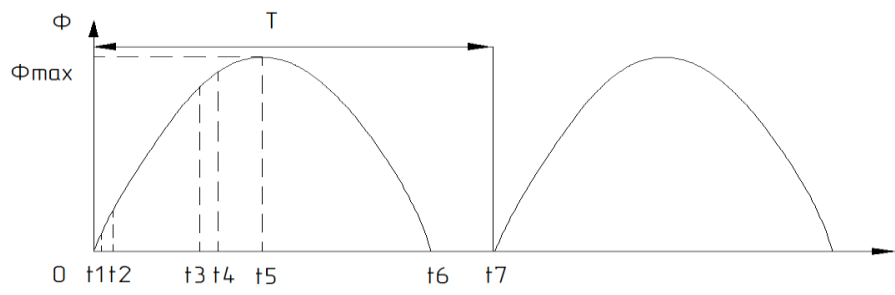


Рисунок 2 – Рабочий цикл бетатрона:

0- $t_5$  – время нарастания магнитного поля  $B$ ;  $t_5$ - $t_6$  – время спада магнитного поля;  $t_6$ - $t_7$  – пауза между циклами;  $T$  - период

Основным этапом, который в значительной степени определяет значение

ускоряемого заряда, т. е. эффективность работы бетатрона, является процесс инжекции электронов. Захват электронов в ускорение и формирование на равновесной орбите сфокусированного пучка ускоряемых электронов происходит в момент времени  $t_1-t_2$ .

Следующим этапом является собственно ускорение. Введенные на равновесную орбиту и сфокусированные электроны под действием силы вихревого электрического поля  $eE_r$  начинают увеличивать свою энергию. Основной задачей на этом этапе является создание условий, позволяющих сохранить сформированный в процессе захвата заряд до конца цикла ускорения.

Магнитный поток, индуцирующий это электрическое поле, зависит от радиуса орбиты электронов. Естественнo предположить, что и  $E$  является функцией радиуса. Напряженность вихревого электрического поля имеет на радиусе равновесной орбиты  $R_0$  минимальное значение. Полученный результат используется на практике для определения положения равновесной орбиты.

Процесс увеличения энергии электронов длится в течение времени  $t_2-t_5$ , т. е. до тех пор, пока существует направленное в нужную сторону индуцированное электрическое поле  $E_r$ , или, другими словами, пока продолжается нарастание магнитного потока  $\Phi$ . Нарастание магнитного поля не может длиться безгранично долго, так как для каждой магнитной цепи существует определенный, технически достижимый предел значения потока  $\Phi_m$  (момент времени  $t_5$ ). После прохождения максимума магнитный поток начинает спадать, и направление вектора  $E_r$  меняет свой знак на противоположный. На участке  $t_5-t_6$  электроны начнут тормозиться и терять свою энергию. Ускорение электронов искусственно прекращают на участке  $t_3-t_4$  рабочего цикла путем смещения с равновесной орбиты на мишень.

Инжекция и смещение занимают весьма небольшую часть рабочего цикла, большую часть времени занимает сам процесс ускорения. Таким образом, в процессе ускорения электронов неизбежны перерывы. Они приводят к



тому, что от бетатрона можно получать быстрые электроны только отдельными, прерывистыми порциями. В следующем цикле ускорения, через промежуток времени, равный периоду  $T$  следования импульсов излучения, последовательность этих процессов повторяется.

### 1.1. Устойчивое движение электрона в магнитном поле бетатрона

Магнитное поле бетатрона, кроме возбуждения вихревого электрического поля, должно также обеспечить фокусировку ускоряемых частиц. Под фокусировкой понимается создание таких условий, которые обеспечивают сколь угодно долгое (отвлекаясь от рассеяния на газе) нахождение частиц в окрестности выбранной орбиты. Для этого необходимо, чтобы при отклонении частиц от расчетной траектории возникали силы, возвращающие частицу к расчетному положению.

Решая задачу о фокусировке электронов в камере бетатрона, необходимо позаботиться о двух видах фокусировки. Во-первых, нужно обеспечить возвращение на равновесную орбиту тех электронов, которые отклонились от нее по направлению к центру или от центра от равновесной орбиты, но не вышли из плоскости орбиты (радиальная фокусировка). Во-вторых, нужно, чтобы электроны, случайно вышедшие из плоскости орбиты вверх или вниз, возвращались снова в плоскость орбиты (аксиальная фокусировка).

Для осуществления радиальной фокусировки, кроме выполнения бетатронного отношения 2:1, необходимо, чтобы вблизи орбиты магнитное поле как функция расстояния от оси вращения убывало с увеличением радиуса медленнее, чем  $1/r$ . В качестве характеристики радиального распределения магнитного поля в циклических ускорителях заряженных частиц используется величина  $n$ , равная

$$n = -\frac{r}{B_r} \frac{\partial B_r}{\partial r} = -\frac{\partial \ln B_r}{\partial \ln r}, \quad (13)$$

которая получила название «показателя спадания магнитного поля», или

«логарифмического градиента магнитного поля».

Если рассматривать область магнитного поля вблизи равновесной орбиты, то при переходе от дифференциалов логарифмов  $B_z$  и  $r$  к малым конечным приращениям, закон спадания магнитного поля будет иметь вид

$$B_r = B_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^n = \frac{const}{r^n}, \quad (14)$$

где индекс нуль обозначает величины, относящиеся к равновесной орбите.

Величина  $n$  в общем случае является функцией радиуса, однако для большинства практических расчетов предполагают, что  $n$  от него не зависит. Такое допущение будет тем точнее, чем меньше расстояние между рассматриваемой областью магнитного поля и равновесной орбитой.

Бетатронным отношением 2:1 и выражением (14) можно воспользоваться для конкретизации требований, предъявляемых к магнитному полю бетатрона. Если магнитное поле в бетатроне от радиуса  $r=0$  будет изменяться по закону  $B_r = const/r^n$ , то среднее значение индукции магнитного поля в круге равновесной орбиты будет равно

$$B_{cp} = \frac{\Phi_0}{2\pi r_0^2} = \int_0^{r_0} \frac{2\pi B_r dr}{\pi r_0^2} = \frac{2}{2-n} B_0. \quad (15)$$

В этом случае отношение среднего значения индукции в круге равновесной орбиты  $B_{cp}$  к индукции магнитного поля на равновесной орбите  $B_0$  окажется меньше двух, и, следовательно, при рассмотренном распределении магнитного поля бетатронное отношение не будет выполняться.

Для соблюдения отношения 2:1 на равновесной орбите следует предположить, что магнитное поле на радиусах, меньших  $r_0$ , изменяется по закону, отличающемуся от  $B_r = const/r^n$ . Очевидно, что для выполнения бетатронного отношения необходимо создать в центральной области внутри орбиты более сильное магнитное поле, которое к периферии должно убывать. Идеализированное распределение магнитного поля по радиусу показано на рисунке 3. В этом случае магнитный поток в круге равновесной орбиты определяется выражением.

$$\Phi_0 = \pi R_c^2 B_c + 2\pi \int_{R_c}^{R_0} r \cdot B_r dr. \quad (16)$$

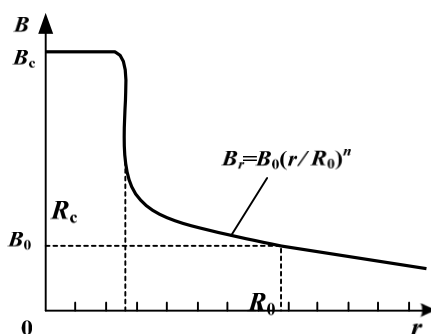


Рисунок 3 – Распределение магнитного поля по радиусу

Изменяя значения индукции магнитного поля  $B_c$  на радиусах, меньших  $R_c$ , можно добиться выполнения бетатронного отношения 2:1. Рассмотрим характер влияния параметра  $n$  на радиальную устойчивость пучка. На рисунке 4 показаны два случая:  $n > 1$  и  $n < 1$ . Кривая  $F_{ц}$  изображает центробежную силу, возникающую при движении электрона по круговой траектории, в функции от радиуса  $r$  последней. Эта кривая – гипербола, так как центробежная сила (7) причем скорость электрона  $v$ , безусловно, можно считать величиной постоянной на протяжении, скажем, одного оборота электрона по орбите.

Вторая сила, действующая на электрон в противоположном направлении, т.е. к центру орбиты, – сила Лоренца  $F_{л}$ , появление которой обусловлено действием магнитного поля на движущийся заряд. Как известно, сила Лоренца равна (5).

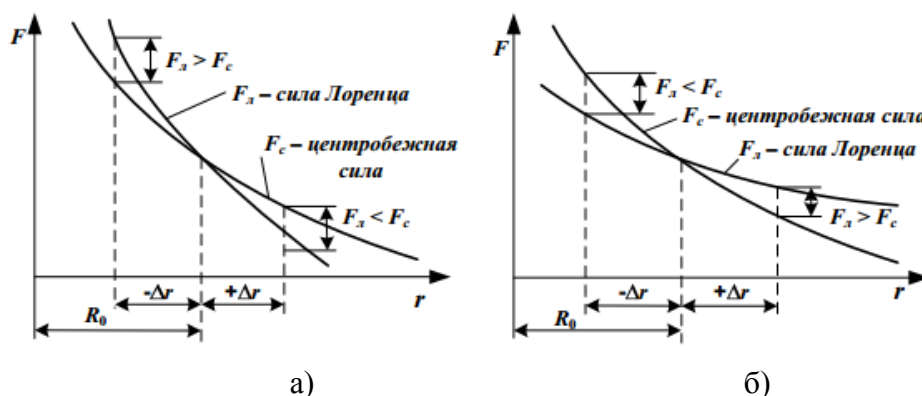


Рисунок 4 – Распределение магнитного поля по радиусу

Следовательно, ход изменения  $F_{\text{л}}$  в функции от  $r$  при заданной скорости  $\vartheta$  всецело определяется видом зависимости  $B$  от  $r$ . Кривые на рисунке 4 (*а* и *б*) изображают  $F_{\text{л}}$  для случая  $B = \text{const}/r^n$  соответственно при  $n > 1$  и при  $n < 1$ . Радиус орбиты электрона, по которой он реально будет двигаться, определяется из условия, что лоренцева и центробежная силы уравниваются друг друга. Так как в нашем случае электрон движется по равновесной орбите, то, следовательно, абсцисса точки пересечения кривых  $F_{\text{ц}}$  и  $F_{\text{л}}$  на рисунке 4 есть не что иное, как  $R_0$  – радиус равновесной орбиты [1].

Положим, что электрон случайно отклонился от равновесной орбиты  $R_0$  и попал в точку, отстоящую от центра на расстоянии  $R_0 + \Delta r$ . Тогда, как легко видеть из рисунка 4, в случае *а* центробежная сила окажется превышающей лоренцеву силу  $F_{\text{ц}} > F_{\text{л}}$ , и в результате электрон будет еще дальше смещаться в сторону больших значений  $r$ , т. е. он не вернется на равновесную орбиту. Наоборот, в случае *б* при положении частицы на радиусе  $R_0 + \Delta r$  мы получаем  $F_{\text{л}} > F_{\text{ц}}$ , так что лоренцева сила будет возвращать электрон по направлению к равновесной орбите. Аналогичные обстоятельства имеют место и в том случае, когда электрон, сбившись с равновесной орбиты, попадет в точку, отстоящую от центра на расстоянии  $R_0 - \Delta r$ . В случае *а* он не возвратится более на равновесную орбиту, так как  $F_{\text{л}} > F_{\text{ц}}$ , а в случае *б* – возвратится на нее ( $F_{\text{ц}} > F_{\text{л}}$ ).

Приведенные выше графические аргументы, разумеется, не являются строгим выводом и даны для наглядности. Однако и точный вывод приводит к тому же результату: для осуществления радиальной фокусировки в бетатроне необходимо, чтобы в точках равновесной орбиты и в области, близкой к ней, показатель степени  $n$  был меньше единицы. Теория показывает, что в этом случае всякий (не чрезмерно сильный) толчок, сбивающий электрон с равновесной орбиты, приводит лишь к тому, что на основное движение электрона по орбите накладывается колебательное движение его около линии орбиты, довольно быстро затухающее, так что в дальнейшем электрон

продолжает по-прежнему двигаться по равновесной орбите.

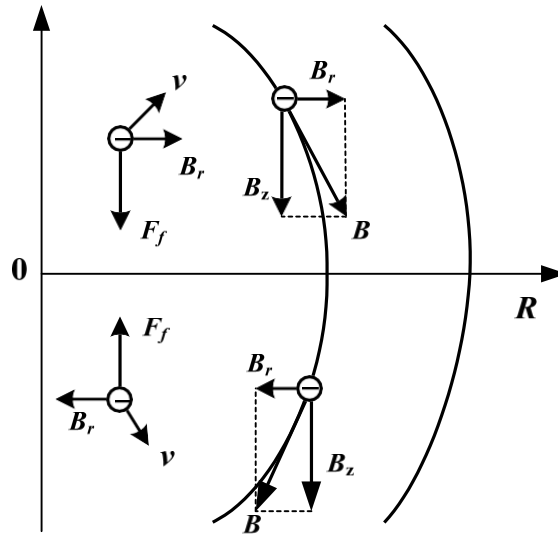


Рисунок 5 – Радиальная и аксиальная составляющие магнитного поля

Аксиально-симметричное магнитное поле, спадающее по радиусу, обладает «бочкообразностью». Силовые линии такого поля имеют вид кривых, направленных выпуклостью от оси поля (рис. 5). Как видно из рисунка, радиальная составляющая магнитного поля  $B_r$  при  $z = 0$  (медианная плоскость) равна нулю, при  $z < 0$  она больше нуля, а при  $z > 0$  направлена против радиуса.

При отклонении электронного пучка от медианной плоскости в результате взаимодействия ускоряемых электронов с радиальной составляющей магнитного поля  $B_r$  на электроны пучка начинает действовать сила Лоренца:

$$\vec{F}_f = e \cdot [\vec{v} \times \vec{B}_r]. \quad (17)$$

Направление силы Лоренца перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы  $v$  и  $B_r$ , и для электронов, имеющих отрицательный заряд, направление силы Лоренца противоположно направлению вектора  $[\vec{v} \times \vec{B}_r]$ .

Это приводит к тому, что в области выше медианной плоскости магнитное поле заворачивает электроны вниз, а в области ниже заворачивает

вверх. Подобная же аксиальная фокусировка по отношению к пучку ускоряемых ионов осуществляется и в циклотроне. Но так как ионы имеют положительный заряд, направление силы Лоренца будет совпадать с вектором  $[\vec{v} \times \vec{B}_r]$ . Направление движения отрицательно и положительно заряженных частиц в магнитном поле циклических ускорителей для выполнения условия аксиальной фокусировки должно быть противоположным.

Таким образом, выбор конкретного значения показателя спада магнитного поля  $n$  ограничен следующими условиями:

- 1) при  $n > 1$  нарушаются условия радиальной фокусировки пучка;
- 2) при  $n < 0$  будет наблюдаться аксиальная дефокусировка пучка;
- 3) при  $n = 0$  будет нарушена вертикальная фокусировка, так как электроны вдоль силовых линий магнитного поля свободно попадут на стенки ускорительной камеры.

Электрон будет совершать устойчивое движение по круговой орбите, поддерживаемый радиальной и вертикальной фокусирующими силами, при соблюдении условия  $0 < n < 1$ .

Циклические ускорители, в которых заряженные частицы совершают устойчивое колебательное движение относительно равновесной орбиты в аксиально-симметричном магнитном поле вида  $B_r = B_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^n$  при  $0 < n < 1$ , называются ускорителями с мягкой (слабой) фокусировкой. Основным недостатком такой фокусировки заключается в малой величине радиальной и вертикальной фокусирующих сил. Следствием этого являются большие амплитуды свободных бетатронных колебаний.

## 1.2. Потенциальная функция

Фокусирующие свойства управляющего поля определяются конфигурацией магнитного поля и его напряженностью. Характеристикой формы поля является показатель спадания  $n$ . Однако эта характеристика, давая

приближенное представление о соотношении аксиальной и радиальной фокусирующих сил, не дает полного представления о фокусирующих свойствах поля, о характере и величине фокусирующих сил, действующих на электронный пучок.

Более наглядной и полной характеристикой фокусирующих свойств магнитного поля является потенциальная функция данного поля  $V_m(r, \theta, z)$ . Поверхность, описываемую потенциальной функцией, принято называть потенциальной ямой. Форма и величина потенциальной ямы определяют значение заряда, который может быть сфокусирован и ускорен в данном поле, а следовательно, и интенсивность излучения ускорителя.

Потенциальная функция позволяет определить требуемые размеры поперечного сечения ускорительной камеры и проследить изменение размеров электронного пучка в течение цикла ускорения.

В теории движение электрона в бетатроне рассматривается как движение в квазистационарном силовом поле с потенциальной энергией поля в данной точке  $V_m$ . Понятие квазистационарности используется в связи с тем, что в действительности силы, действующие на электрон, зависят не только от положения электрона, но и изменяются со временем, что противоречит определению стационарного силового поля. Однако понятие силового поля при некоторых условиях оказывается справедливым и для бетатрона.

Действительно, при большой скорости, с которой движется электрон в существующих ускорителях даже в начале ускорения, время его обращения на орбите исчисляется десятками и сотыми долями микросекунды. Изменение же полей и сил происходит со значительно меньшей скоростью, характеризующейся периодом изменения магнитного и связанного с ним вихревого электрического полей. За время одного и даже нескольких десятков оборотов электрона в бетатроне состояние магнитного поля изменится на ничтожно малую величину. Поэтому силовая функция  $V_m$  определяется как квазипотенциальная функция данного электромагнитного поля.

В электродинамике поле магнитной индукции  $\mathbf{B}$  является строго вихревым ( $\text{div} \mathbf{B} = 0$ ). Для этого поля вводят векторный потенциал  $\mathbf{A}$ , называемый также вектор-потенциалом магнитного поля  $\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}$ . Вектор-потенциал  $A(x, \theta, z, t)$  рассматривается как вспомогательная величина, не допускающая прямых измерений, но облегчающая расчет электромагнитных полей. Обращение к векторному потенциалу позволяет упростить выражение для энергии взаимодействия  $W$  системы зарядов и токов (объемная плотность  $\rho$  и  $j$ ) с внешним электромагнитным полем.

Подобно тому, как скалярный потенциал (потенциальная функция) связан с понятием энергии, векторный потенциал обнаруживает тесную связь с понятием импульса. Частица с зарядом  $q$  в электромагнитном поле в дополнение к обычному (чисто динамическому) импульсу обладает еще электрокинетическим импульсом

$$p_{\text{ЭК}} = q\mathbf{A}/c. \quad (18)$$

Выражение потенциальной функции  $V_m$  через вектор-потенциал  $\mathbf{A}$  поля записывается в виде

$$V_m = \frac{e}{2mc^2} \cdot A^2 = \frac{e}{2mc^2} [r \cdot \bar{H}_z(r)/2]. \quad (19)$$

На рисунке 6, а построены графики потенциальной функции.

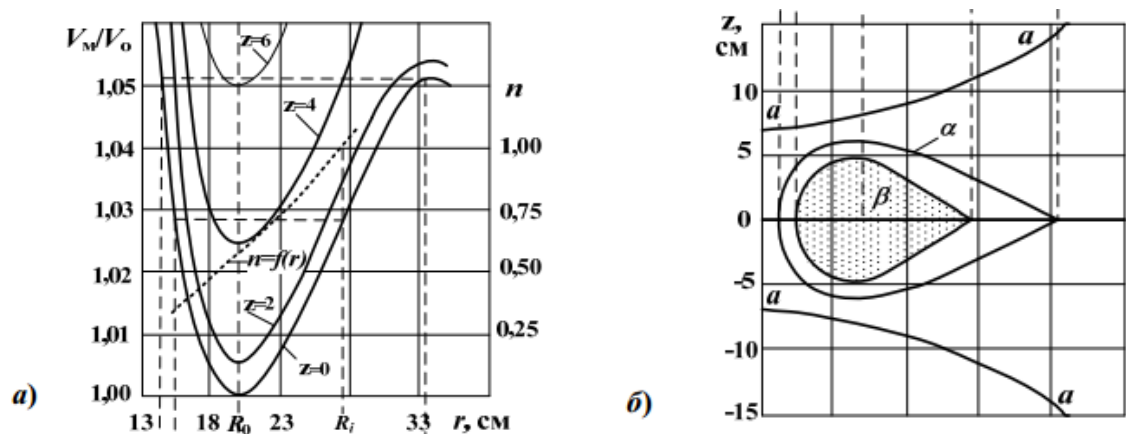


Рисунок 6 – Расчетные характеристики магнитного поля бетатрона КБС-25

Поскольку эти графики имеют минимум, их часто называют «потенциальными ямами». Минимум потенциальной функции дает положение



равновесной орбиты. Электроны, находящиеся вблизи минимума потенциальной функции с энергией, не превышающей высоты потенциальных барьеров, условно называют «нулевыми» электронами. [2]

Электроны, обладающие энергией больше энергии минимума потенциальной функции, но меньше энергии высоты потенциального барьера, под действием силы квазипотенциального поля совершают, как в гармоническом осцилляторе, радиальные колебания с амплитудой, ограниченной точками пересечения кривой потенциальной функции с уровнем энергии, соответствующей энергии электронов.

Существенными характеристиками потенциальной ямы являются площади ее сечения радиальной плоскостью, т. е. площади, охватываемые линией равного потенциала. Для построения какой-либо эквипотенциали для заданного уровня  $z$  берут фиксированное значение вектор-потенциала  $A_z$

$$A_z = (2mc^2/e)\sqrt{V_{mz}}. \quad (20)$$

На рисунке 9, б приведены эквипотенциальные линии, соответствующие вершине барьера ямы и на уровне, соответствующем энергии инжекции  $\beta$ . Площадь, охватываемая эквипотенциалью  $\alpha$ , определяет область действия фокусирующих сил. Сечение вакуумной камеры бетатрона должно целиком охватывать эту площадь. Эквипотенциаль  $\beta$  задает границы зоны максимального равновесного заряда.

Максимальный равновесный заряд, который может удержать магнитное поле бетатрона, определяется выражением

$$Q = \frac{E_i}{2eR_0} \left[ \left( \frac{E_i}{E_0} \right)^2 - 1 \right] \cdot S_0, \quad (21)$$

где  $e$  – заряд электрона, ед. СГС;

$R_0$  – радиус равновесной орбиты, см;

$E_0$  и  $E_i$  – энергия покоя и полная энергия инжектированных электронов, эрг;

$$E_i = E_0 + eU_i,$$

$U_i$  – напряжение инъекции, В;

$S_0$  – площадь, охватываемая эквипотенциалью  $\beta$ , см<sup>2</sup>.

Выражение (21) позволяет объяснить характер зависимости интенсивности излучения бетатрона от напряжения инъекции  $U_i$ . При невысоком напряжении инъекции ( $E_i \ll E_0$ ) интенсивность излучения пропорциональна  $U_i$ , при  $E_i = E_0$  интенсивность пропорциональна  $E^2$ , а при  $E_i \gg E_0$  стремится к  $\sim E^3$ . Отсюда следует вывод: для значительного увеличения числа ускоряемых частиц необходимо увеличивать энергию инжектируемых электронов.

Формула (21) получена в Гауссовской системе единиц и неоднократно цитировалась в литературе. Система единиц СГС (по названию основных единиц измерения – сантиметр, грамм, секунда) часто встречается в специальной технической литературе при расчете электромагнитных полей, так как в этой системе единиц расчетные формулы имеют более удобный вид. При ее практическом применении следует учесть, что в системе СГС  $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  ед. СГС,  $1 \text{ Кл} = 3 \cdot 10^9 \text{ СГСЭ}$ , а  $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$ .

Обобщая вышеизложенное, стоит сказать, что наибольшую информацию о характеристике магнитного поля несут функция распределения магнитной индукции по радиусу, показатель спада магнитного поля и потенциальная функции. В процесс исследования стоит уделить им особое внимание.

## **2. Система инжекции**

Под инжекцией понимается ввод пучка частиц на равновесную орбиту для дальнейшего его ускорения или накопления. В бетатроне для ввода электронов в ускорение применяется система инжекции, которая включает в себя электронную пушку – инжектор, генератор импульсов тока высокого напряжения и устройство согласования момента ввода инжектируемых частиц с уровнем магнитного поля на равновесной орбите.

### **2.1. Требования к системе инжекции**

Практическая ценность того или иного бетатрона наряду с другими факторами оценивается значением тока ускоренных электронов или пропорциональным ей значением интенсивности тормозного излучения. Значение тока ускоренных электронов определяется количеством захваченных в ускорение электронов. В ускорение могут захватиться только те электроны, которые обладают вполне определенными начальными условиями своего движения: их начальная энергия и координаты должны позволять им находиться в той или иной потенциальной яме. В этом случае электроны, совершая затухающие колебания относительно соответствующих устойчивых орбит, могут обойти инжектор и захватиться равновесной орбитой.

Для устойчивого движения электрону необходимо двигаться в области, где существуют фокусирующие силы магнитного поля, т. е. потенциальная функция имеет минимум. По мере увеличения радиального расстояния от равновесной орбиты глубина потенциальной ямы становится меньше. Потенциальная функция имеет вид кривой с перегибом. Естественно, что расположение инжектора на радиусах, больших радиуса, соответствующего точке перегиба предельной потенциальной кривой, приведет к невозможности перевода электронов в нулевую потенциальную яму. Таким образом, наибольшее удаление инжектора от

равновесной орбиты не должно превышать расстояния между точкой перегиба предельной кривой и минимумом нулевой потенциальной ямы.

Известно, что точка перегиба характеризуется равенством нулю первой и второй производной функции по соответствующей координате в данной точке, т. е.  $\frac{d^2V_m}{dr^2} = 0$ . Это условие выполняется при  $n = 1$ . Поэтому инжектор при его наружном расположении относительно орбиты целесообразно помещать на радиус, где  $n = 1$ . В этом случае увеличивается вероятность обхода электронами электронной пушки, что приводит к увеличению полного числа электронов, ускоряемых в бетатроне, а значит, и к увеличению интенсивности тормозного излучения.

Источник электронов не может находиться на основной устойчивой (равновесной) орбите, а должен быть расположен сверху или снизу ее плоскости или в этой же плоскости, но на радиусах, больших или меньших, чем радиус равновесной орбиты.

Инжектор имеет некоторые элементы конструкций (анодная коробочка и инфлектор), расположенные ближе к равновесной орбите, чем точка вылета из него электронов. Для того чтобы электрическое поле электродов инжектора не сказывалось на траектории электронов, проходящих мимо инжектора после завершения одного или нескольких оборотов, анод пушки выполняется в виде закрытой коробочки и заземляется. Поэтому импульс, генерируемый схемой инжекции, должен быть отрицательным.

Энергия вводимых в камеру бетатрона электронов должна быть согласована с индукцией магнитного поля на орбите и с радиусом орбиты. Количественную связь между этими величинами можно определить из следующего условия: в релятивистском случае полная энергия  $E_{\pi}$  заряженной частицы равна

$$E_{\pi} = \sqrt{W(W + 2E_0)} = 300B_0R_0 \sin \omega t, \quad (22)$$

где  $W$  и  $E_0$  – кинетическая энергия и энергия покоя электрона (МэВ);

$\omega t$  – угол (радиан).

Подставляя в эту формулу значения  $E_0 = 0,511$  МэВ и энергию инжектируемых электронов, равную напряжению инъекции  $W_i = eU_i \cdot 10^{-3}$  ( $U_i$  в кэВ), и решая это уравнение относительно момента инъекции  $t_i$  – времени, отсчитываемого от стартового импульса, запускающего схему питания электромагнита бетатрона, получаем в нерелятивистском случае ( $U_i \ll E_0$  и  $\sin \omega t = \omega t$ ) для энергий ввода электронов до 50 кэВ условие инъекции имеет вид

$$t_i = \frac{1}{\omega} \frac{\sqrt{10^{-3} U_i \cdot 2 E_0}}{300 B_0 R_0} = \frac{106 \cdot 10^{-6} \sqrt{U_i}}{\omega B_0 R_0}. \quad (23)$$

Это условие показывает, что для работы ускорителя необходимо напряжение и момент инъекции согласовывать с конструктивными параметрами ускорителя ( $R_0, B_0, \omega$ ). Требуемое согласование осуществляется путем изменения момента инъекции  $t_i$  или напряжения инъекции  $U_i$ . Поскольку для получения максимальной интенсивности излучения стремятся работать при возможно большем напряжении инъекции, то основным регулируемым параметром является момент (фаза) инъекции. Точность регулировки момента инъекции в соответствии с допустимыми отклонениями энергии вводимых электронов должна быть не ниже долей процента. Невыполнение этого условия приведет к неустойчивости интенсивности излучения бетатрона [3].

Длительность интервала захвата электронов в ускорение, как правило, не превышает 0,5 мкс, что соответствует 50–100 оборотам электронов по орбите. При такой многооборотной инъекции, которую обычно применяют в бетатронах, длительность импульса инъекции должна быть значительно больше длительности интервала захвата.

В связи с тем, что для выполнения условия инъекции энергия вводимых электронов должна меняться по квадратичному закону, высказывалось предположение о том, что рабочий участок импульса напряжения инъекции должен изменяться по форме, соответствующей изменению магнитного поля

(рис. 7). Производились попытки приблизиться к ней путем формирования импульсов специальной формы.

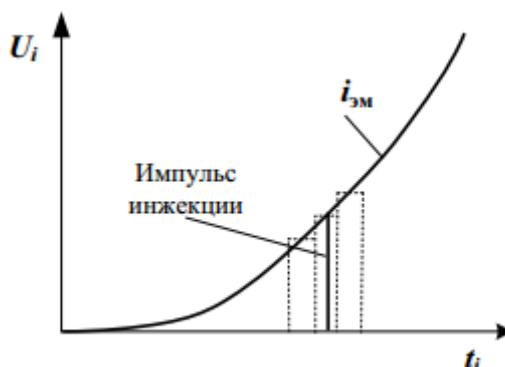


Рисунок 7 – О форме импульса инжекции

Экспериментальные исследования по влиянию формы импульса на выход излучения проводились в разных лабораториях. Исследовались импульсы с двумя пиками на вершине, импульсы с тремя ступенями (изображенные на рис. 7 пунктиром), импульсы прямоугольной и трапецеидальной формы. Сформировать такие импульсы на практике сложно. Разноречивые экспериментальные данные не позволили однозначно определить наиболее рациональную форму импульса, подаваемого на инжектор. Теоретических изысканий в этой области также не имеется. В настоящее время принято считать, что удовлетворительную работу бетатрона можно получить с импульсом полусинусоидальной формы длительностью 3...10 мкс. Получение меньшей длительности импульса инжекции ограничивается ферромагнитными характеристиками сердечника высоковольтного импульсного трансформатора.

Улучшению условий захвата электронов в ускорение способствует уменьшение скорости роста магнитного поля на этапе инжекции. С этой целью были разработаны специальные схемы питания электромагнита с переменной областью действия фокусирующих сил. При включении такой схемы питания на кривой зависимости плотности магнитного потока  $B_{эм} = f(t)$  (рис. 8) в моменты времени  $0-t_3$  образуется так называемая «полка», на протяжении которой скорость роста магнитного поля замедляется. Инжекция электронов

выполняется в промежуток времени  $t_2-t_3$  в поле с медленно изменяющимся магнитным потоком, что позволяет увеличить время ввода электронов в ускорение и тем самым повысить эффективность захвата электронов в ускорение.

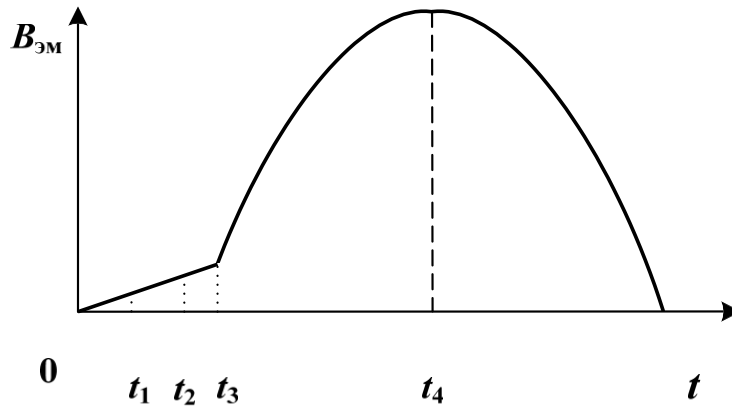


Рисунок 8 – Изменение плотности магнитного потока во времени

Интенсивность излучения, генерируемая ускорителем, определяется числом захваченных в ускорение частиц. Силы магнитной фокусировки возрастают с увеличением напряженности магнитного поля. Эти силы компенсируют силы кулоновского расталкивания электронов и позволяют создавать большую плотность электронов в пучке, т. е. увеличить число захватываемых в ускорение частиц. Следовательно, для увеличения интенсивности излучения необходимо увеличить начальную энергию электронов.

Зависимость предельного заряда  $Q$  от площади сечения пучка  $S_0$  и энергии инжекции электронов  $E_i$  определяется формулой (21). Из формулы следует, что с увеличением напряжения инжекции увеличивается предельный заряд  $Q$ , а следовательно, растет и ток  $I_{п}$  пучка, и выход излучения. Эта зависимость является нелинейной. Во всех циклических ускорителях заряженных частиц, в том числе и в бетатроне, рост интенсивности (тока) пучка пропорционален  $\beta^2\gamma^3$ , где  $\beta$  и  $\gamma$  – релятивистские факторы инжектируемого пучка.

Для каждой конструкции ускорителя существует максимальный (критический) ускоряемый заряд, определяемый фокусирующими силами

магнитного поля и размерами междуполюсного пространства. В стационарных и малогабаритных бетатронах энергия инжектируемых частиц равна 40...70 кэВ, зависимость  $I_{\pi} = f(U_i)$  практически линейна. В сильноточных бетатронах напряжение инъекции составляет 200...400 кВ, и эта зависимость приближается к квадратичной.

Предел энергии инъекции обуславливается только техническими и экономическими соображениями. Максимальное значение энергии инъекции достигнуто в безжелезном бетатроне на 60 МэВ ВНИИ экспериментальной физики и составляет  $\sim 2$  МэВ. Следует отметить, что создание системы инъекции на 2 МэВ не привело к ожидаемому результату. Достигнутое значение заряда, ускоряемого за один цикл, незначительно превышает заряд, ускоряемый в сильноточных бетатронах при энергии инъекции 300 кэВ. А по своим массогабаритным параметрам эта система инъекции превосходит сам ускоритель.

При низковольтной инъекции  $U_i < 80$  кВ в бетатроне проявляется эффект, связанный с релятивистским изменением массы и скорости электронов. Если кинетическую энергию представить в электроновольтах, то, выражая произведение индукции на радиус вращения, из (4.1) получаем:

$$BR = \frac{\sqrt{W(W+2E_0)}}{c} = \frac{m_0 c}{e} \sqrt{\gamma^2 - 1}, \quad (24)$$

зависимость изменения радиуса вращения от кинетической энергии. В бетатроне на первом этапе ускорения индукция магнитного поля на орбите изменяется линейно от энергии и времени.

При энергиях  $W > E_0$  линейная зависимость  $BR = f(W)$  говорит о том, что изменение массы электрона происходит пропорционально изменению индукции  $B$ .

А при энергиях  $W < E_0$  релятивистское изменение массы электрона не согласуется с характером изменения индукции  $B$ . Нелинейная зависимость  $BR=f(W)$  приводит к изменению круговой частоты обращения и радиуса  $R_i$



вращения электронов.

Рассмотренные выше условия инжекции позволяют сформулировать требования к схемам инжекции электронов в бетатроне:

- схема инжекции должна генерировать отрицательный импульс напряжения с длительностью 3...10 мкс и амплитудой от нескольких десятков до сотен киловольт;
- в схеме необходимо предусматривать элементы, согласующие момент подачи импульса напряжения с напряженностью магнитного поля;
- надо обязательно предусматривать устройства, позволяющие плавно менять фазу инжекции;
- желательно иметь устройства для плавной регулировки напряжения инжекции;
- целесообразно предусматривать устройства автоматической стабилизации параметров инжекции;
- схема должна быть надежна, экономична и проста в эксплуатации.

## **2.2. Вакуумная камера и инжекторное устройство**

Электрон при движении по равновесной орбите во время ускорения совершает в бетатроне около миллиона оборотов, то есть проходит путь, измеряемый сотнями километров. Для того чтобы электрон мог пройти такой путь, необходимо создать условия, сводящие к минимуму возможность соударения электрона с молекулами воздуха. Поэтому ускорение электрона осуществляется в вакуумной ускорительной камере.

Общий вид отпаянной ускорительной камеры приведен на рисунке 9. Она состоит из трех основных узлов: стеклянного баллона 3, инжектора 4 и титанового поглотителя газа – геттерного узла 1.

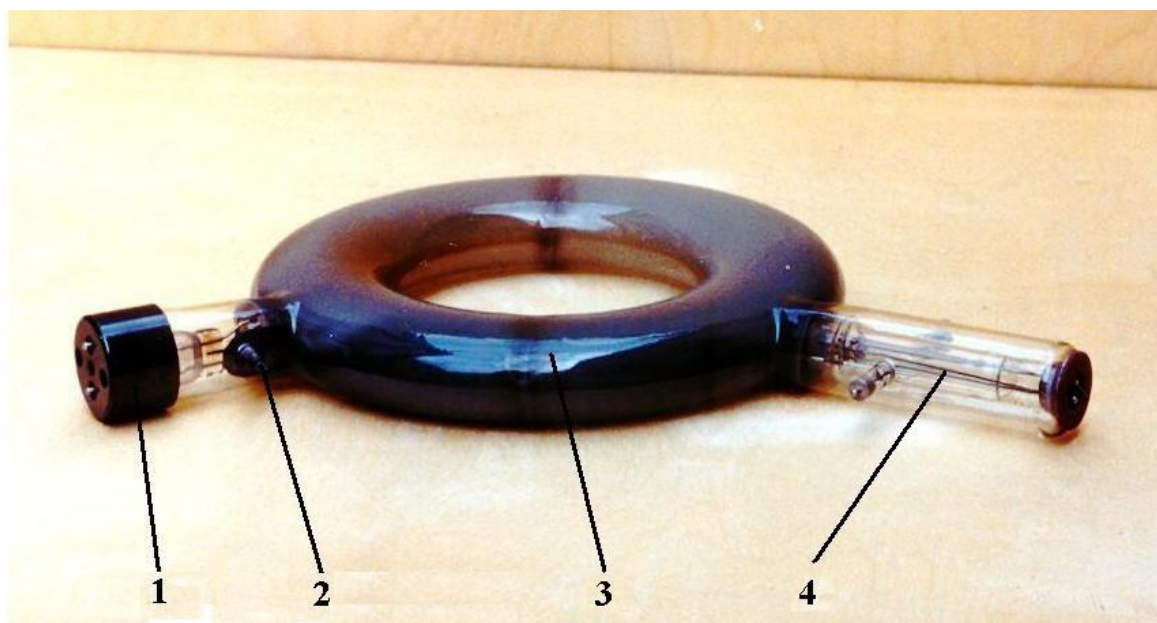


Рисунок 9 – Ускорительная камера. Общий вид:

1 – геттерный узел с мишенью; 2 – вывод проводящего слоя; 3 – баллон камеры; 4 – инжектор

Баллон камеры изготавливается из молибденового стекла и имеет форму тороида. Овальная форма сечения камеры обеспечивает ее механическую прочность, а выбор материала обусловлен тем, что молибденовое стекло позволяет выполнять вакуумно-прочные спаи с молибденовыми держателями инжектора и выводами геттерного узла.

Первые отпаянные вакуумные камеры для бетатронов были изготовлены в мастерских Томского политехнического института. Баллон камеры выдувался в чугунной форме, имеющей профиль, соответствующий профилю камеры. После тщательного отжига на внутреннюю поверхность камеры наносится проводящее покрытие. Необходимость проводящего покрытия обусловлена тем, что в процессе ускорения часть электронов вследствие соударения с молекулами остаточного газа отклоняется от равновесной орбиты и оседает на стенках камеры. На стенках образуется отрицательно заряженный поверхностный заряд, который мешает ускорению электронов, движущихся по равновесной орбите. Проводящее покрытие заземляется, и электроны, попадающие на него, стекают на землю.

Для отпаянных камер в качестве такого покрытия применяется полупроводниковая пленка на основе двуокиси олова. Эта пленка обладает хорошей адгезией к стеклу, малой сорбционной способностью и хорошо обезгаживается в процессе откачки. Полупроводниковая пленка наносится методом обработки внутренней поверхности камеры парами двухлористого олова. Камера помещается в электрическую печь, и при температуре порядка 400 °С в нее вводится испаритель, в который насыпана навеска обезвоженного двухлористого олова. Пары олова омывают внутреннюю поверхность камеры, происходит гидролиз, в результате которого на поверхности стекла появляется полупроводниковая пленка.

Вывод проводящего покрытия осуществляется через коваровый ввод, который заваривается в геттерный патрубок. Электрический контакт ковара с проводящей пленкой достигается вжиганием серебра.

Первоначально высокий вакуум в ускорительной камере получается при ее изготовлении. При работе камеры электроны бомбардируют покрытие стекла, в результате чего выделяется некоторое количество газа. Поэтому необходим газопоглотитель – в его качестве применяется титановый сорбционный насос. Он представляет собой титановую трубку, внутри которой находится вольфрамовый подогреватель. Такой титановый насос позволяет многократно производить распыление титана и за счет его большой сорбционной способности поддерживать в отпаянной камере вакуум порядка 270...70 мкПа ( $2 \cdot 10^{-6}$ ... $5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.) [4].

Жесткое тормозное излучение генерируется при сбросе ускоренных электронов на мишень. В качестве мишени используются материалы с высоким атомным номером  $Z$ . Для этих целей в отечественных бетатронах применяется вольфрам ( $Z = 74$ ), в бетатронах фирмы Brown- Bowery – платина ( $Z = 78$ ). Место расположения мишени определяет направление выхода тормозного излучения из камеры. Часто мишень помещается на тыльной стороне инжектора, в некоторых бетатронах устанавливается автономная мишень,

которая крепится на проволочном молибденовом держателе. Такая мишень может быть расположена как у внутренней стенки вакуумной камеры, так и на радиусах, больших  $R_0$ .

Серийный выпуск отпаянных камер был налажен производственным объединением «Светлана». Камеры выпускались под условным обозначением БУК-ХХ (БУК – бетатронная ускорительная камера; ХХ – энергия электронов, МэВ. Например, БУК-25 – камера на энергию 25 МэВ). После модернизации производства и расширения модельного ряда бетатронов по энергиям камеры выпускаются с маркой РБК-ХХ (РБК – рентгеновская бетатронная камера).

Новые бетатроны снабжаются тремя вакуумными отпаянными камерами. Настройка ускорителя выполняется таким образом, чтобы при работе с любой из этих камер выход излучения соответствовал заданному в техническом задании значению.

В случаях, когда предусматривается возможность проведения экспериментальных исследовательских работ, связанных с нарушением вакуума в камере, бетатронная установка комплектуется откачным вакуумным постом.

Источником электронов в бетатроне, создающим сформированный пучок, служит электронная пушка – инжектор. Основная часть источника электронов – катод, активированная часть которого эмитирует электроны. Электрическое поле в промежутке анод–катод ускоряет эти электроны, формирует пучок и направляет его далее в ускорительную камеру. Все три электрода – катод, фокусирующий электрод и анод – монтируются при помощи молибденовых держателей на стеклянном цоколе камеры.

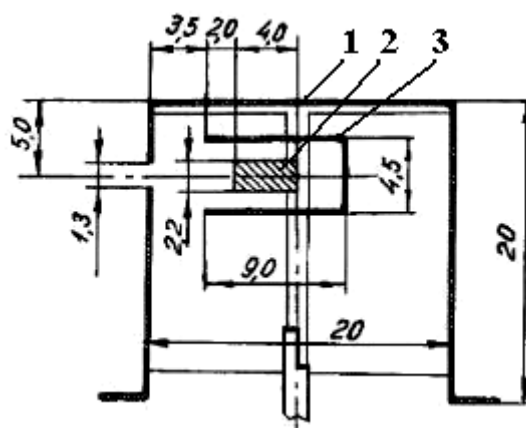


Рисунок 10 – Инжектор типа Керста на 70 кэВ:

1 – анод; 2 – катод; 3 – фокусирующий электрод

Большинство инжекторов, используемых в бетатронах, представляет собой трехэлектродную пушку типа Керста. Схема инжектора дана на рисунке 10. Катод 2 помещен в глубину фокусирующего электрода (цилиндр Венельта) 3, изготовленного из молибденовой жести и находящегося под потенциалом катода. Оба эти электрода находятся внутри третьего электрода – анода 1. Анод имеет вид коробочки, изготовленной из тантала. В передней части анода, напротив открытой стенки фокусирующего электрода, прорезана узкая щель, через которую электроны выходят за пределы анода. Анод находится под потенциалом земли, а на катод и фокусирующий электрод подается высоковольтный отрицательный импульс напряжения. Под действием образованной разницы потенциалов электроны в инжекторе приобретают начальную скорость, необходимую для их захвата в ускорение.

При нагревании катода электроны вначале испускаются во все стороны. Часть электронов выходит из окна фокусирующего электрода, а часть оседает на его стенках. Электрод заряжается отрицательно, и в дальнейшем электроны оседать на него уже не могут. Траектория движения электронов изменяется, и они направляются в окно фокусирующего электрода. Таким образом, доля электронов, выходящих из инжектора, с применением фокусирующего электрода увеличивается.

Ввиду того, что в инжекторе типа Керста фокусирующая и

дефокусирующая области сосредоточены на малом расстоянии анод–катод, электронно-оптические характеристики инжектора весьма чувствительны к неточностям монтажа. Наиболее чувствительной частью инжектора, определяющей его электронно-оптические свойства, являются параметры фокусирующей линзы, образованной системой катод – цилиндр Венельта. Большая чувствительность линзы, образованной этой системой, обусловлена тем, что линза находится в области, где скорости электронов малы.

Приведенное на рисунке 10 оптимальное положение катода относительно цилиндра Венельта, при котором электронный пучок наиболее сфокусирован, получено экспериментально.

Источником электронов в инжекторе служит подогреваемый переменным током до высокой температуры катод. В отпаянных камерах серии БУК в качестве катодов использовались спиральки из торированного вольфрама. Такие катоды обладают высокой удельной эмиссионной способностью при довольно устойчивой работе.

Но проволочным катодам присуща деформация при нагреве, что приводит к ухудшению электронно-оптических свойств инжектора. Кроме того, торий – радиоактивный изотоп. Поэтому в камерах серии РБК эти катоды были заменены на экологически чистые импрегнированные катоды. Импрегнированные катоды представляют собой запрессованную в молибденовый колпачок губку из смеси порошков тугоплавких металлов, пропитанную смесью карбонатов Ва и Са с окисью Al вольфрамо-рениевой и обеспечивают высокую эмиссионную способность катода (средняя плотность тока до  $5 \text{ А/см}^2$ ). Эти катоды благодаря жесткой конструкции свободны от провисаний, присущих проволочным катодам, и имеют больший срок службы. Но у импрегнированных катодов наблюдается явление «отравления». После развакуумирования и пребывания на воздухе катод теряет эмиссионную способность. Восстановление эмиссионной способности вне заводских условий представляет собой довольно сложную задачу.

### 3. Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью науки и техники. Цифровой анализ компонентов, в частности, стал важной частью разработки новых продуктов или оптимизации уже существующих разработок. В настоящее время широкий спектр возможностей доступен для моделирования. Исследователи используют всевозможные базовые языки программирования для того, чтобы расширить возможности для исследования. Все эти методы объединяет одно – необходимость достичь надежных результатов.

Простыми словами, компьютерное моделирование реальных процессов – это перевод реальных физических процессов с их собственными законами в их виртуальную форму. Идеальным случаем будет тот, когда мы имеем возможность добавить любой физический эффект в нашу модель.

Для моделирования процесса инжекции электронов в бетатроне была выбрана система инженерного анализа Comsol Multiphysics. Comsol Multiphysics (далее Comsol) – это среда моделирования для решения задач, связанных с совмещением различных физических явлений. Такой подход позволяет максимально точно воспроизвести физические процессы. В частности, это позволяет изучить свойства различных материалов, приборов и устройств, промоделировать различные режимы работы, в том числе, новые и дать им адекватную оценку. Любое инженерное исследование или разработка нового продукта требует исследования всех аспектов объекта исследования, с которым приходится работать. И подход, в котором каждое явление изучается отдельно, не является до конца верным, так как все эффекты, которые мы можем наблюдать в природе – это всегда комбинация различных физических явлений.

### 3.1. Постановка задачи

В системе инженерного анализа (далее CAE, от англ. Computer-Aided Engineering) Comsol для описания физических интерфейсов используется простой термин – физика. Далее в работе выражение «физика магнитных полей» или «физика трассировки частиц» следует понимать, в первую очередь, как физический интерфейс. Любая задача в Comsol задается с помощью физики или их комбинаций. Соответственно, первый этап создания модели – выбор физик.

Компьютерная модель бетатрона должна заключать в себе физику магнитных полей, описывающую поля, индуцированные обмотками бетатрона, физику электрических полей и физику взаимодействия частиц между собой. Эти физики в целом описывают принцип действия бетатрона и физические явления, описанные в предыдущем разделе диссертации.

Все эти физики находятся в модуле AC/DC (рис. 11). Модуль AC/DC – это модуль содержащий интерфейсы для расчета электрических и магнитных полей в статичных и низкочастотных системах, то есть тех, где длина волны значительно больше, чем исследуемый прибор. Модуль позволяет моделировать электрические схемы, проводники тока, магнитные и электрические поля с их полным векторным описанием, орбиты заряженных частиц и различные электрические машины.



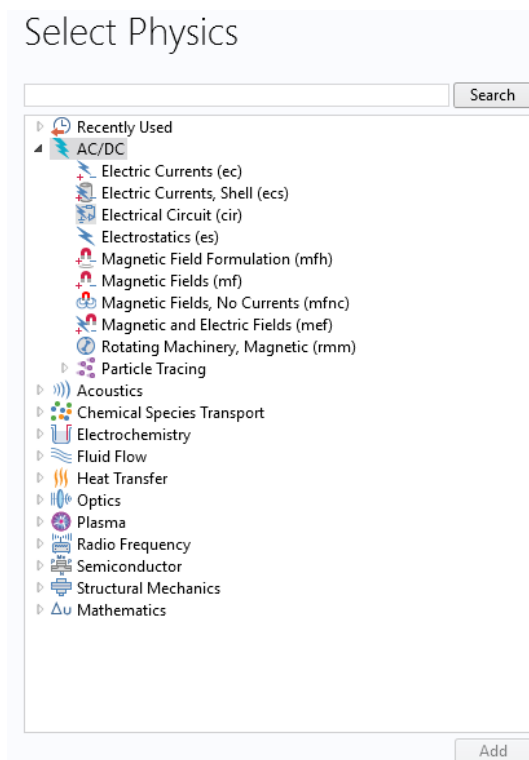


Рисунок 11 – Модуль AC/DC и поддерживаемые им интерфейсы

Физика магнитных полей используется для расчета магнитных полей и распределения индуцированных токов в- и вокруг катушек, проводников и магнитов. Физический интерфейс решает уравнения Максвелла, сформированные относительно магнитного вектор-потенциала и, в частности для катушек, скалярного электрического потенциала как от зависимой переменной.

Физика электростатики используется для расчета электрических полей, электрического поля смещения и распределения потенциала в диэлектриках. Физический интерфейс решает уравнения по закону Гаусса для электрических полей, используя электрический потенциал как зависимую величину.

Физика трассировки заряженных частиц используется для моделирования орбит заряженных частиц под влиянием электромагнитных полей. Также физика позволяет моделировать взаимодействие частиц между собой. Наиболее типовое применение физики находится в моделировании ускорителей частиц, вакуумных трубках и ионных имплантаторах.

### 3.2. Модель бетатрона

После определения типа решаемой задачи, приступаем к созданию геометрии будущей модели бетатрона. В качестве исходных данных были взяты чертежи бетатрона МИБ-10 с энергией излучения 10 МэВ, а в качестве исходных параметров вакуумной камеры и инжекторного устройства был взят инжектор камеры РБКЗ-3М.

На рисунке 12 представлены изображение инжектора и его геометрические параметры.



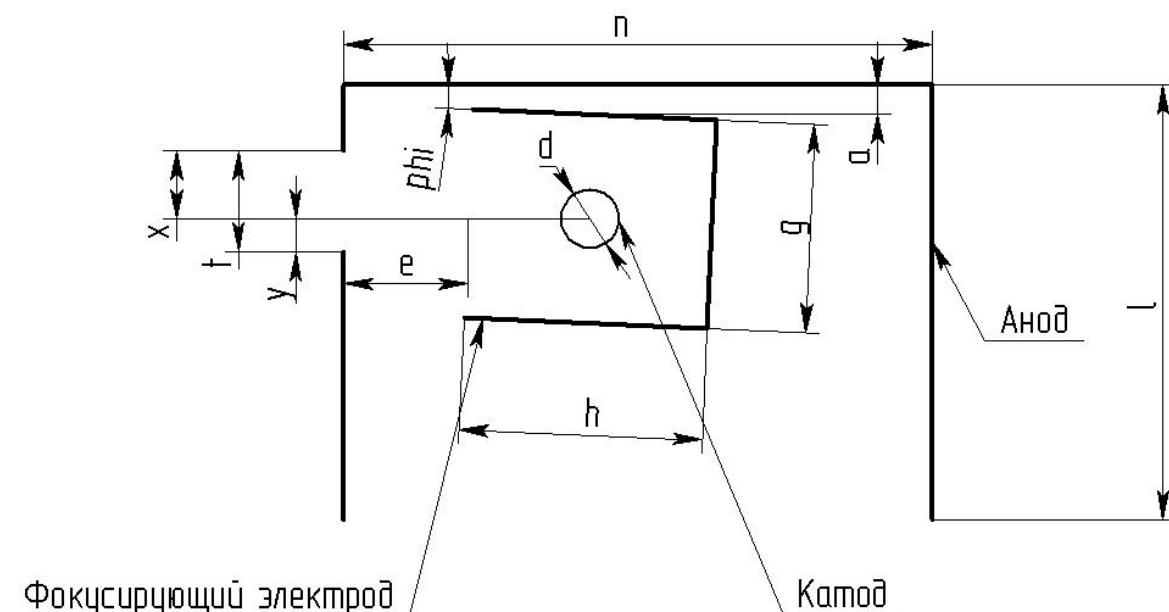


Рисунок 12 – Инжектор и его схематический чертеж с обозначением параметров

Параметр **a** определяет электрическую прочность инжектора и показывает расстояние между серединой верхней пластины фокусирующего электрода.

Параметр **e** показывает расстояние между фокусирующим электродом и щелью анода.

Параметр **f**, не показанный на рисунке, называется несоосностью и определяется следующим образом. Через середину проекции фокусирующего электрода проводится линия, перпендикулярная щели. Далее измеряется расстояние от этой линии до краев щели **x** и **y**, и по формуле (25) рассчитывалась несоосность **f**. Положительным считается смещение вверх.

$$f = \frac{x-y}{2}. \quad (25)$$

Угол наклона фокусирующего электрода относительно анода **φ** определяется как угол между верхними пластинами анода и фокусирующего электрода. Положительным считается угол поворота против часовой стрелки.

Параметр **t** – ширина анодной щели. Через анодную щель электроны покидают инжектор.

Параметры  $h$  и  $g$  определяют ширину и высоту фокусирующего электрода соответственно. Также необходимо учесть горизонтальное  $sH$  и вертикальное  $sV$  смещение катода относительно центра фокусирующего электрода. Определенное значение имеет параметр  $d$ , описывающий диаметр катода [4].

Для упрощения моделирования по данным параметрам была создана параметрическая модель бетатрона и инжектора. Параметризация упрощает манипуляции с моделью, позволяет мгновенно изменять геометрию модели, а также позволяет решать мультифизическую задачу для набора моделей с разными геометрическими параметрами. Изображение исследуемой модели на рисунке 13.

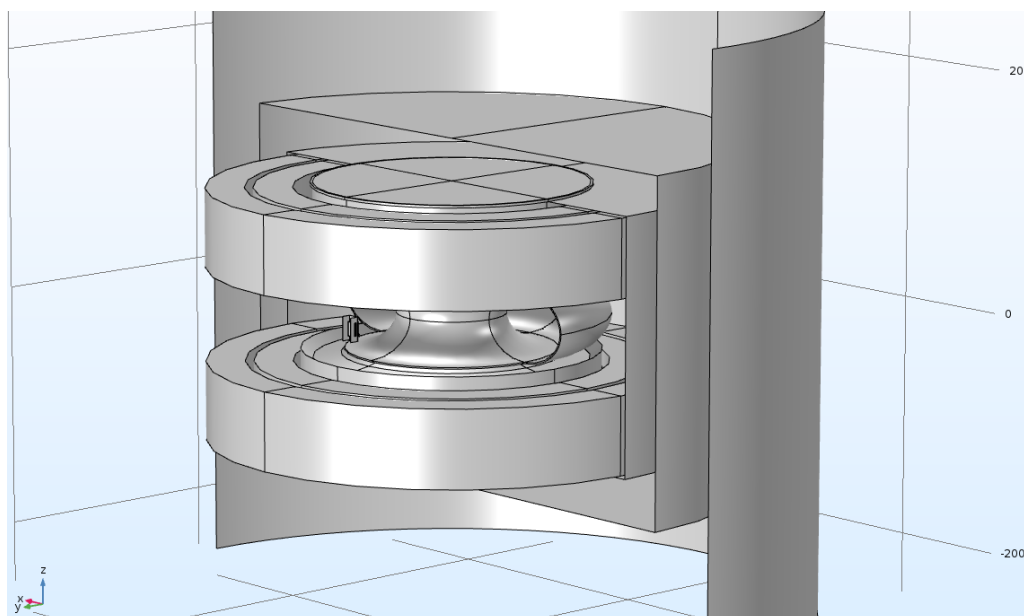


Рисунок 13 – Изображение модели бетатрона с инжектором в Comsol Multiphysics

### 3.3. Определение свойств материалов

Следующий этап – выбор материалов. Все элементы конструкции по свойствам разделены на 3 группы: электрические проводники из меди, элементы магнитопровода из электротехнической стали и немагнитные элементы системы. Особое значение здесь имеют свойства электротехнической

стали, так как именно они определяют свойства индуктивные свойства магнитного поля, создаваемого в межполюсном пространстве. Кривая намагничивания этой стали представлена на рисунке 14.

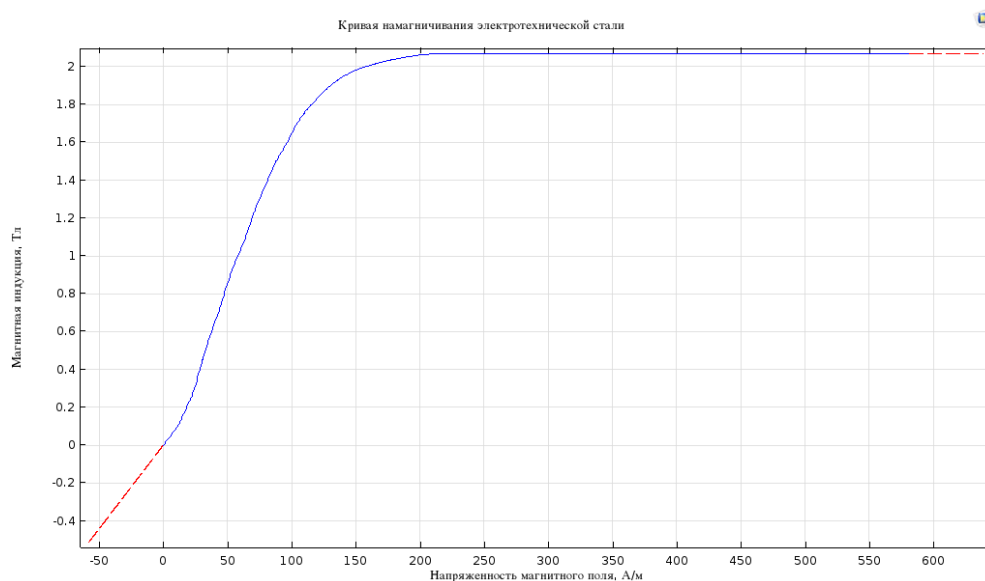


Рисунок 14 – Кривая намагничивания электротехнической стали

Анализируя кривую намагниченности, стоит сказать, что свойства стали во многом определяют предельную энергию ускоренных электронов. Материал должен быть магнитомягким, но при этом иметь высокое значение индукции насыщения.

Для немагнитных элементов конструкции в качестве магнитных и электрических свойств были выбраны, с некоторым допущением, свойства вакуума.

### 3.4. Определение граничных условий

Граничные условия определяют сущность физических процессов, протекающих в модели.

#### 3.4.1. Физика «Magnetic Fields»

Физика магнитных полей решает следующие уравнения:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ \nabla \times A = B, \\ \sigma E + J_e = J \end{cases} \quad (26)$$

где  $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}$  – оператор Гамильтона, векторный дифференциальный оператор, компоненты которого являются частными производными по координатам,

$H$  – напряженность магнитного поля,

$J$  – плотность тока,

$A$  – вектор-потенциал,

$B$  – магнитная индукция или плотность магнитного потока,

$\sigma$  – диэлектрическая проницаемость материала,

$E$  – напряженность электрического поля,

$J_e$  – плотность внешнего тока (созданного внешним источником)

Основным узлом физики является Закон Ампера, который добавляет уравнения для расчета магнитного вектор-потенциала и обеспечивает интерфейс для определения материальных соотношений и их соответствующих свойств, таких как относительная проницаемость. Другим базовым узлом является определение магнитной изоляции. Магнитная изоляция является граничным условием, которое приравнивает касательную компоненту магнитного вектор-потенциала равной нулю на граничной поверхности:

$$\vec{n} \times A = 0 \quad (27)$$

Элементы магнитной цепи описываются кривой намагничивания, представленной ранее. Магнитный поток, индуцируемый в цепи, определяется плотностью внешнего тока в зависимости от напряжения инжекции, формы полюса и других параметров таким образом, чтобы индуцированный поток был согласован с магнитной индукцией на равновесной орбите, которая в свою очередь, должна соответствовать энергии инжектированных электронов.

### 3.4.2. Физика «Electrostatics»

Физика электрических полей описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho_V \\ E = -\nabla V \end{cases}, \quad (28)$$

где  $D$  – электрическая индукция или электрическое смещение,

$\rho_V$  – объемная плотность заряда,

$E$  – напряженность электрического поля,

$V$  – электрический потенциал.

Основой данной физики является уравнение сохранения заряда согласно закону Гаусса для поля электрического смещения. Устанавливаемыми значениями здесь является электрический потенциал элементов инжектора. Для фокусирующего электрода и катода эти значения равны -40 кВ. Напыление на внутренней поверхности вакуумной камеры является проводящим. Анод и внутренняя поверхность заземлены, их потенциал равен 0 В.

### 3.4.3. Физика «Charged Particle Tracing»

Физика трассировки заряженных частиц решает уравнения движения заряженных частиц. Это позволяет рассчитывать силы, действующие на ионы и электроны, включая predetermined электрические и магнитные силы, а также силы, возникающие при столкновении частиц. В общем случае, физика описана вторым законом Ньютона:

$$\frac{dm_p v}{dt} = F_t, \quad (29)$$

где  $m_p$  – масса частицы,

$v$  – скорость частицы,

$\frac{dm_p v}{dt}$  – приращение импульса частицы,

$F_t$  – сила, действующая на данную частицу.

Для упрощения расчетов используется метод макрочастиц. Суть метода

заключается в том, что исследуется не каждая отдельно взятая частица, а макрочастица, заключающая в себе большое количество малых частиц. Данный метод крайне удобен, когда влияние одной, отдельно взятой частицы не имеет большого значения для системы. Это позволяет в значительной степени упростить модель и ускорить расчет. Для нашей модели параметры макрочастицы определены свойствами  $10^4$  электронов, то есть каждая частица – это группа из  $10^4$  электронов.

Со стороны магнитного поля на заряженную частицу действует сила Лоренца. По своей природе сила Лоренца не ускоряет частицу, а лишь меняет ее направление:

$$F = q(v \times B), \quad (30)$$

где  $q$  – заряд частицы.

Магнитная индукция  $B$  рассчитывалась ранее в физике магнитных полей. Сила Лоренца является центростремительной и направлена к главной оси бетатрона. В свою очередь, противодействует ей центробежная сила. Подробнее о значении их соотношениях можно узнать из предыдущей главы.

Сила, действующая со стороны электрического поля, описывается уравнением:

$$F = q \cdot (-\nabla V), \quad (31)$$

Данное уравнение показывает, что взаимодействие с электрическим полем будет лишь в тех областях, где присутствует разность потенциалов. Так как потенциал на аноде и стенках вакуумной камеры одинаковый, взаимодействие частиц с электрическим полем за пределами инжектора будет минимальным. Это позволяет обеспечить более устойчивое движение заряженных частиц в магнитном поле.

Ключевое значение для бетатрона имеет кулоновое взаимодействие частиц между собой:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N q q_j \frac{r-r_j}{|r-r_j|^3}. \quad (32)$$



Данное уравнение показывает, что сила, действующая на частицу со стороны остальных частиц, является суммой кулоновской силы действующей со стороны всех частиц. Если количество частиц на единицу объема менее  $10^{13}$  частиц/м<sup>3</sup>, то эффектом взаимодействия частиц можно пренебречь. В бетатроне на последних этапах инжекции это значение выше более чем в 15 раз. Достижение такого значения объемной плотности заряда приводит к значительным изменениям в потоке заряженных частиц, инжектированных в межполюсное пространство бетатрона.

#### **3.4.4. Влияние начальных тепловых скоростей электронов на формирование электронных потоков**

Уделим некоторое внимание непосредственно физическому описанию инжекции электронов. Инжекция осуществляется за счет термоэлектронной эмиссий, вызванной нагревом катода до температуры  $T$ . Для описания энергетических состояний электронов в металле используется статистика Ферми-Дирака, применяемая к системам тождественных фермионов (как правило, частиц с полуцелым спином, подчиняющихся принципу запрета Паули, то есть, одно и то же квантовое состояние не может занимать более одной частицы). Распределение Ферми-Дирака позволяет сделать вывод о распределении электронов в металле по энергиям (рис. 15). Распределение Ферми-Дирака является функцией температуры, соответственно, чем выше температура, тем более размыта ступенька. Это говорит о росте числе электронов с большей энергией. Если значение этой энергии начинает превышать работу выхода с поверхности металла, такой электрон способен вырваться из металла и стать свободным электроном. Такой электрон может быть захвачен электрическим полем и ускоренным в межполюсном пространстве.

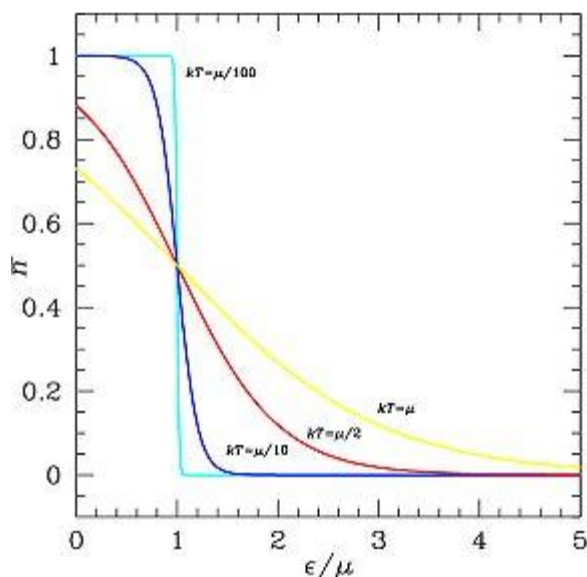


Рисунок 15 – Распределение Ферми-Дирака

Для расчета средней энергии электронов с энергией больше работы выхода электрона необходимо рассчитать интегральную сумму энергии всех электронов с энергией выше работы выхода и поделить на число этих электронов. Решив данное уравнение можно прийти к весьма очевидному еще из школьной программы выводу о связи температуры частицы и ее энергии:

$$E_{\text{ср}} = kT, \quad (32)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,

$T$  – температура частицы.

Таким образом, средняя тепловая энергия эмитированных электронов равна 0,215 эВ.

Стоит упомянуть о том, что существует эффект, вызывающий нарушение формирования потока электроном. Данный эффект вызван тем, что тепловые электроны вылетают с катода под всевозможными углами. В числе их имеются электроны, вылетающие параллельно или почти параллельно поверхности катода. Таким образом, под действием тепловых скоростей пучок электронов будет расширяться. Это расширение прямопропорционально расстоянию между катодом и анодом  $d$  и обратнопропорционально квадратному корню анодного напряжения  $U_a$ :

$$\Delta = 3 \sqrt{\frac{U_0}{U_a}} d . \quad (33)$$

Подставив в уравнение значения параметров, можно вычислить, что расширение пучка под действием тепловых скоростей равен порядка 10 мкм. Размер поперечного сечения пучка на этапе инжекции (во время движения между анодом и катодом) составляет приблизительно 1.5 мм, что значительно больше, чем его расширение за счет тепловых скоростей. Следовательно, для упрощения модели считаем, что все электроны покидают катод нормально к его поверхности.

### 3.5. Конечно-элементная сетка

Comsol является одной из многих программ, которая использует для решения уравнений метод конечных элементов (МКЭ). Особенности МКЭ, обеспечившими ему ведущее положение в прикладной вычислительной математике, стали присущие методу:

- универсальность – пригоден для решения самых различных задач математической физики (механика деформируемого тела, теплопроводность, задачи электродинамики);
- хорошая алгоритмируемость – возможность разработки программных комплексов, охватывающих широкий круг прикладных задач;
- хорошая численная устойчивость МКЭ алгоритмов.

Суть метода конечных элементов заключается в замене исходной пространственной конструкции сложной формы на дискретную математическую модель, должным образом отражающую физическую сущность и свойства исходного изделия. Важнейшим элементом этой модели является конечно-элементная дискретизация изделия - построение совокупности элементарных объёмов заданной формы (т.н. конечных элементов, КЭ) объединённых в единую систему (т.н. конечно-элементную сетку) [5].

Параметры сетки играют значительную роль в вычислениях. Они влияют на скорость и точность расчета. Автоматически генерируемая сетка хоть и создается с учетом этих требований, содержит внутри себя элементы с большим разбросом размеров. Также, в случае создания КЭС для осесимметричных конструкций, которую, например, имеет бетатрон, большую роль играет осевая симметричность сетки, так как азимутальная вариация КЭ будет иметь пагубное влияние на точность моделирования. Пример сетки, сгенерированной автоматически и с помощью ручных настроек, представлены на рисунке 16.

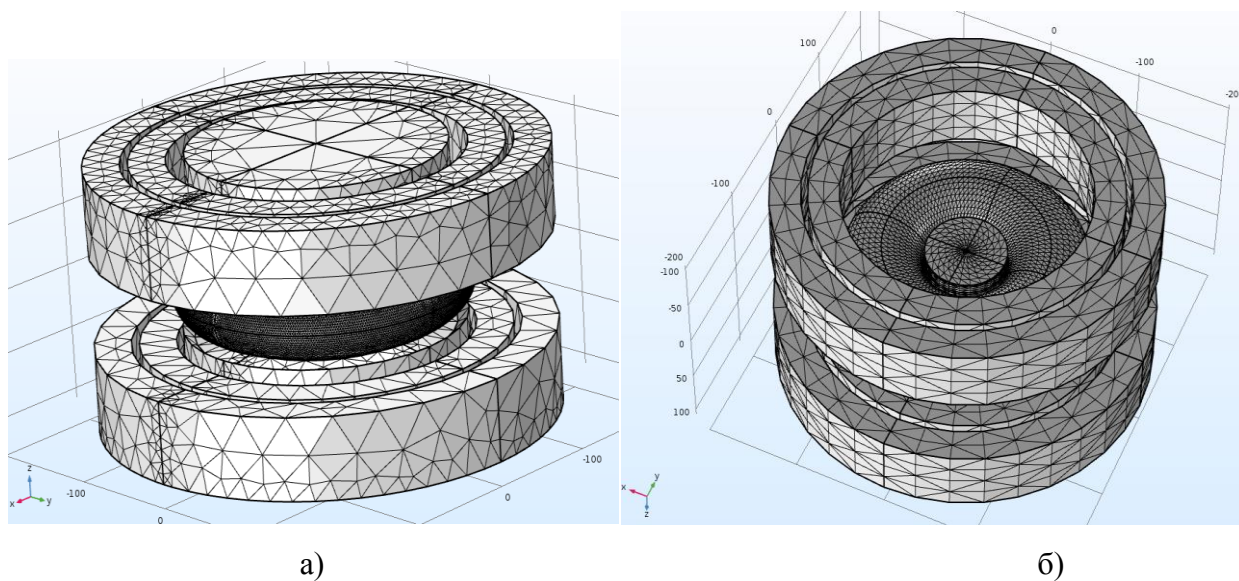


Рисунок 16 – Автоматически сгенерированная КЭС (а) и КЭС с ручными настройками (б)

Помимо очевидного улучшения симметричности КЭС, очевидны явные преимущества сетки с ручной настройкой. Количество элементов в сетке (б) меньше на 40%, а средний разброс размеров элементов сетки меньше в 1.5 раза. Помимо этого, сетка с ручной настройкой может быть параметризирована. Эта возможность интересна тем, что позволяет промоделировать различные варианты размеров элементов сетки, тем самым найти наиболее оптимальных вариант в соотношении качество-скорость расчета.

### 3.6. Расчет

Расчет задачи разделен на 2 этапа: решение стационарной задачи и решение задачи, зависимой от времени. Стационарная задача – это такая задача, где значение переменной не меняется во времени. В электромагнетизме это применимо к статическим электрическим или магнитным полям, в той же степени, как к постоянным токам. В задачах теплопередачи, используется для расчета температурных полей на термальное равновесие. В механике твердых тел, используется для расчета статических деформаций, нагрузок и напряжений.

Второй этап расчета относится к переменным, значения которых меняется во времени. Например, в электромагнетизме, для расчета неустановившегося электромагнитного поля, включая распространение электромагнитных волн во временном промежутке. В теплопередаче, это используется для расчета изменения температуры во времени. В трассировке заряженных частиц, это используется для расчета изменения координаты и скорости частицы во времени.

## **7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований [15].

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на вопросы: будет ли продукт востребован рынком; какова будет его цена; каков бюджет научного проекта; какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д. [16].

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;

- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования [17].

## **7.1. Предпроектный анализ**

### **7.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

В качестве заинтересованных могут выступать организации, сфера деятельности которых затрагивает следующие области:

- в онкологических клиниках для проведения комбинированного лечения с интраоперационной лучевой терапией;
- дефектоскопия;
- таможенного контроля;
- в исследовательских целях институтов.

### **7.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 12. В качестве конкурирующих разработок были приняты: увеличение интенсивности тормозного излучения бетатрона, с помощью увеличения частоты следования импульсов излучения  $K_1$ , улучшение техники ввода и механизма захвата электронов в режим ускорения  $K_2$ . Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле (36):

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (36)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя [15].

Из данного анализа можно судить о явном преимуществе выбранного в данной работе метода.

Таблица 12 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{k1}$	$B_{k2}$	$K_{\phi}$	$K_{k1}$	$K_{k2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,22	5	3	1	1,1	0,66	0,22
2. Помехоустойчивость	0,1	4	2	1	0,4	0,2	0,1
3. Качество интеллектуального интерфейса	0,2	5	5	2	1	1	0,4
4. Надежность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
5. Потребность в ресурсах памяти	0,1	2	3	5	0,2	0,3	0,5
6. Простота эксплуатации	0,01	2	5	3	0,02	0,05	0,03
7. Удобство в эксплуатации	0,05	4	4	1	0,2	0,2	0,05
8. Функциональная мощность	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
2. Уровень проникновения на рынок	0,01	1	2	5	0,01	0,02	0,05
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
4. Цена	0,01	5	5	3	0,05	0,05	0,03
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>4,38</b>	<b>3,57</b>	<b>2,68</b>

Вывод: Метод увеличения интенсивности тормозного излучения, использованный в данной работе имеет преимущество перед конкурирующими разработками благодаря хорошей помехоустойчивости и надежности, и



удобстве эксплуатации, но данный метод сложен в эксплуатации.

### **7.1.3. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Для этого раздела выбираю следующие методы коммерциализации научных разработок:

1. Организация собственного предприятия
2. Инжиниринг, как самостоятельный вид коммерческих операций, предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции [18].

### **7.1.4. SWOT-анализ**

SWOT-анализ представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Его применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Анализ проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды [19].

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT и выявить стратегию изменения. Результаты второго этапа приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	+
	B2	+	+	0	+
	B3	-	0	+	-
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1		Сл2	
	B1	+		+	
	B2	+		+	
	B3	+		+	
Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	0	-	-	+
	У2	+	+	+	+
	У3	0	+	0	+
Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1		Сл2	
	У1	0		+	
	У2	+		+	
	У3	-		-	

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая представлена в таблице 14.

Таблица 14 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. возможность исследования тормозного излучения бетатрона с высокой точностью; С2. небольшие расхождения результатов с известными исследованиями; С3. простота эксплуатации.	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> – Сл1. трудоемкость расчетов;
<b>Возможности:</b> –В1. свободный доступ программного обеспечения;	1. Возможность портативного использования	При решении различных задач, могут возникнуть проблемы инженерного

–В2. многофункциональность программного обеспечения (использование для разнообразных задач);	программы для различных задач; 2. Возможность проведения расчетов для различных задач.	характера. Возможность независимого пользования
<b>Угрозы:</b> – У1. поломка ЭВМ; –У2. отсутствие коммерческого интереса к проекту; – У3. погрешности расчётов из-за неверного выбора начальных условий.	1.Возможность улучшения безопасности работы с программой и анализа рынка потребителей.	1. Возникновение трудностей при расчете.

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

## 7.2. Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта [20].

В таблице 15 представлена информация о иерархии целей проекта в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, а так же требования предъявленные к проекту.

Таблица 15 – Цели и результат проекта

<b>Цели проекта:</b>	1. Завершить исследования по повышению эффективности инжектирования электронов 2. Подготовить эксперимент, подтверждающий данные моделирования 3. Внести поправки в конструкторскую документацию 4. Внедрить измененные элементы конструкции в производство
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Воспроизводимость
	Надежность
	Постоянные характеристики
	Дешевизна

В таблице 16 приведена организационная структура проекта: состав рабочей группы, роль и функции каждого участника в данном проекте.

Таблица 16 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо- затраты, год.
1.	Валерий Николаевич Бориков, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, директор ИНК	Руководитель проекта	Отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта. Является руководителем магистерской диссертации	1
2.	Михаил Михайлович Штейн, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, зав. лаб. Разработки бетатронов	Эксперт проекта	Техническое руководство, постановка задач, техническое обеспечение.	1
3.	Андрей Анатольевич Коломейцев	Исполнитель по проекту	Проведение расчетов, организация экспериментов, обработка данных	1
ИТОГО:				1

Таким образом, данные исследования ведутся в течение 1 лет.

### 7.3. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы 17.

Таблица 17 – Календарный план проекта.

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, раб.дни	Сроки работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
---------------------------	----------	--------------------------	-------------	--

1.	Составление технического анализа	30	июль. – авг. 2016	А.А. Коломейцев
2.	Патентный поиск и анализ аналогов	30	авг.-сен. 2016	А.А. Коломейцев
3.	Проведение исследований	60	Сен.-дек.2016	А.А. Коломейцев
4.	Оценка правильности полученных результатов	60	окт. - дек. 2016	А.А. Коломейцев
5.	Определение целесообразности внесения изменений	30	дек. 2016 - янв. 2017	А.А. Коломейцев
6.	Исследования по обновленным данным	40	январь- февр. 2017	А.А. Коломейцев
7.	Оценка эффективности применения результатов исследования	70	фев. - апр. 2017	А.А. Коломейцев
8.	Составление конструкторской документации	50	апр. - июн. 2017	А.А. Коломейцев
9.	Подготовка технологических карт изготовления новых элементов конструкции	60	май. - июль 2017	А.А. Коломейцев
10.	Проведение экспериментов	30	июль –авг., 2014	А.А. Коломейцев

### 7.3.1. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям:

1. Специальное оборудование и расходные материалы для проведения исследований инжектора бетатрона.

Таблица 18 – Расчет затрат по статье «Специальное оборудование и расходные материалы для проведения исследований инжектора бетатрона»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1	Компьютер высокой мощности	1	200	200
2	Программный пакет Comsol Multiphysics	1	300	300
Итого:				500

## 2. Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (36)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (37)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 19);

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (38)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 19).

Таблица 19 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365

Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	15	15
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени ( $F_d$ )	250	250

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_б \cdot k_p, \quad (39)$$

где  $З_б$  – базовый оклад, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 20.

Таблица 20 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$З_б$ , руб.	$k_p$	$З_m$ , руб.	$З_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$З_{осн}$ , руб.
Руководитель	20000	1,3	26000	1081,6	250	270400
Эксперт	20000	1,3	26000	1081,6	250	270400
Исполнитель	10000	1,3	13000	540,8	250	135200

3. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} \quad (40)$$

где  $З_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты (12%);

$З_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице 21 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 21 - Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель	Эксперт
Основная зарплата, руб.	270400	135200	270400
Дополнительная зарплата, руб.	32448	16224	32448

#### 4. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (41)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составляет 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (270400 + 32448) = 90854,4 \text{ руб};$$

Отчисления для исполнителя:

$$C_{\text{внеб}} = 45427,2 \text{ руб.}$$

Для эксперта

$$C_{\text{внеб}} = 90854,4 \text{ руб.}$$

#### 5. Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйственного инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнение темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (35),$$

где  $K_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов, равный 30+10=40 %.

Где дополнительные 10% учитывают амортизацию.

Накладные расходы составят:

Для руководителя:



$$C_{\text{накл}} = 0,4 \cdot (270400+32448) = 121139,2 \text{ руб.}$$

Для эксперта:

$$C_{\text{накл}} = 0,4 \cdot (270400+32448) = 121139,2 \text{ руб.}$$

Для исполнителя:

$$C_{\text{накл}} = 0,4 \cdot (135200+16224) = 60569,6 \text{ руб.}$$

#### **7.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

##### **7.4.1. Объем платежеспособного рынка**

По оценкам экспертов за последние 60 лет во всем мире было введено в эксплуатацию более 27 тыс. ускорителей различного промышленного назначения. При этом большая часть из них приходится на ионную имплантацию и электронно-лучевую обработку материалов. Следует отметить, что из рассматриваемых категорий промышленных ускорителей исключены внутренние устройства формирования пучка (электронно-лучевые трубки, рентгеновские трубки, системы для литографии или электронно-лучевой микроскопии и так далее). Поскольку в среднем жизненный цикл промышленных ускорителей оценивается в 20-40 лет, то можно предположить, что в настоящее время из этого числа эксплуатируется порядка 75% (или около 20 тыс. единиц) ускорителей. В целом, несмотря на достаточно медленное изменение технологий, скорость внедрения ускорителей в качестве промышленных инструментов обработки неуклонно возрастает на протяжении последних лет. Так по данным за 2010 год общая стоимость продуктов и товаров, обработанных, облученных или досмотренных с использованием пучков заряженных частиц превысила 500 млрд долларов США [21].

#### 7.4.2. Интегральный показатель эффективности научного исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения [22].

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 21).

Таблица 21 – Оценка характеристик исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,4	5
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5
3. Помехоустойчивость	0,05	4
4. Энергосбережение	0,2	5
5. Надежность	0,2	4
6. Материалоемкость	0,05	5
ИТОГО	1	

$$I_{p-ист} = 5 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,05 = 3,95$$

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## Список публикаций

1. Коломейцев А.А., «Компьютерное моделирование инжекции в бетатроне», XVIII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 2017.
2. Коломейцев А.А., «Диагностика температурных полей магнитопровода бетатрона», Неразрушающий контроль: сборник трудов V-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015 – Т. 2 – С. 484
3. Kolomeytsev A. A. Overview of the market of particle accelerators used for non-destructive testing // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции. В 3 т., Томск, 23-27 Мая 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 3 - С. 420-424
4. Коломейцев А. А. , Смолянский В. А. Система синхронизации циклов работы бетатрона МИБ-4 и линейного детектора ионизирующего излучения X-SCAN INE2 // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность : сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции. В 3 т., Томск, 23-27 Мая 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 160-164
5. Коломейцев А. А. , Стасевский В. И. Применение САПР-технологий для развития пространственного мышления обучающихся // Педагогика и психология: проблемы развития мышления: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 10 Ноября 2015. - Красноярск: СГТУ, 2015 - С. 110-116